



המדריך ההנדסי המלא

משאבות צנטריפוגליות

תכן, בחירה, נצילות ותחזוקה · מהתאוריה לשטח

מאת יהודה בוז'ו

מהנדס מים ואנרגיה · 15 שנות ניסיון בשטח · 20 סקרי אנרגיה

2026 · מהדורה ראשונה · water-energy.co.il



המדריך ההנדסי המלא

משאבות צנטריפוגליות

תכן, בחירה, נצילות ותחזוקה · מהתאוריה לשטח

יהודה בוז'ו

מהנדס מים ואנרגיה · M.Sc הנדסת אנרגיה, אפקה · B.Sc הנדסת מים, כנרת
מבצע סקרי אנרגיה לפי דרישות משרד האנרגיה

בוז'ו · מים ואנרגיה · מהדורה ראשונה 2026

משאבות צנטריפוגליות • המדריך ההנדסי המלא

מהדורה ראשונה, 2026. מאת יהודה בוז'ו, מהנדס מים ואנרגיה.

© 2026 יהודה בוז'ו. כל הזכויות שמורות. אין לשכפל, להעתיק, לצלם, להקליט, לתרגם, לאחסן במאגר מידע, לשדר או לקלוט בכל דרך או אמצעי אלקטרוני, אופטי, מכני או אחר, כל חלק שהוא מן החומר שבספר זה, אלא ברשות מפורשת בכתב מאת המחבר.

הספר נכתב למטרות לימוד והדרכה מקצועית. הנוסחאות, הטבלאות וההמלצות מבוססות על תקנים בינלאומיים (ISO, EN, HI) ועל ניסיון שדה. אין באמור בספר משום תחליף לשיקול דעת הנדסי, לבדיקה בשטח או לייעוץ מקצועי פרטני לכל מקרה ומקרה. המחבר אינו אחראי לנזק ישיר או עקיף שייגרם משימוש בחומר.

מונחים מקצועיים מובאים בעברית ובאנגלית זה לצד זה. ערכי תעריפי החשמל והמים מעודכנים לשנת 2026 ועשויים להשתנות.

יצירת קשר, הערות ועדכונים: www.water-energy.co.il • yehuda@water-energy.co.il

למה הספר הזה

משאבה צנטריפוגלית היא הלב הפועם של כל מערכת מים ואנרגיה. היא מזרימה מי שתייה לערים, מקדמת קולחים בחקלאות, מסחררת מים במערכות קירור, ומרימה מים ממאות מטרים מתחת לאדמה. ובכל זאת, רוב מי שמתפעל אותה לעולם לא למד באמת איך היא עובדת.

במשך חמש עשרה שנים מדדתי, בחנתי ושיפצתי משאבות בשדה. ראיתי משאבות שעובדות בנצילות של 45 אחוז וצורכות חשמל מיותר חודש אחר חודש בלי שאיש הבחין. ראיתי תחנות שאיבה שנבחרו לא נכון מהיום הראשון, ומשאבות שהוחלפו כשהיה צריך רק לשפץ. כמעט תמיד, הבעיה לא הייתה חוסר כסף או חוסר ציוד. היא הייתה חוסר ידע נגיש.

בעברית פשוט אין ספר אחד, מקצועי וברור, שמרכז את כל עולם המשאבה הצנטריפוגלית במקום אחד. יש מאמרים מפוזרים, קטלוגים של יצרנים, ותקנים באנגלית שקשה לפצח. הספר הזה בא לסגור את הפער. הוא נכתב כדי שמהנדס מים, מהנדס מכונות, מנהל אחזקה, ממונה אנרגיה וגם סטודנט בשנה ראשונה, יוכלו כולם לפתוח אותו ולמצוא בדיוק את מה שהם צריכים, ברמת העומק שמתאימה להם.

בניתי אותו בשתי שכבות. הטקסט הראשי מסביר כל נושא בשפה אנושית, עם דוגמאות מהשדה, כך שגם מתחיל יוכל לעקוב. לצדו, בתיבות צבעוניות, יש את הפיתוחים, הנוסחאות והתקנים ברמה שמהנדס מנוסה יצפה לה. כל מושג מובא בעברית ובאנגלית, מפני שכך עובדים בשטח. כל נוסחה מלווה בדוגמה מספרית, ולעיתים קרובות בנתון אמיתי מתוך מאות בדיקות שביצעתי בשטח.

המטרה שלי פשוטה. שאחרי שתסיים את הספר, תסתכל על כל משאבה אחרת. שתדע לקרוא את העקום שלה, לחשב את הנצילות שלה, לבחור אותה נכון, ולהבין מתי היא בריאה ומתי היא מבזבזת. זה הידע שלקח לי שנים בשטח לצבור, וכאן הוא לפניך מסודר.

יהודה בוז'ו

מהנדס מים ואנרגיה · 2026

איך לקרוא את הספר לפי התפקיד שלך

הספר בנוי כך שאפשר לקרוא אותו מההתחלה לסוף כקורס שלם, או לקפוץ ישיר לנושא שצריך. הנה ארבעה מסלולים מומלצים לפי מי שאתה.

מנהל אחזקה

מנהל תחזוקה / מתקנים

אתה אחראי שהמשאבות יעבדו ולא ייתקעו. הדגש שלך הוא מבנה, ניטור מצב, רעידות ואיתור תקלות.

מסלול: 21 → 24 → 22 → 7 → 5

מהנדס תכן ובחירה

מהנדס מים / מכונות

אתה בוחר משאבות ומתכנן מערכות. תתחיל מהבסיס ההידראולי, ותתעמק בעקומות, בחוקי הדמיות וב-NPSH.

מסלול: 2 → 3 → 12 → 13 → 14 → 15 → 16

סטודנט

לומד הנדסה

אתה רוצה ללמוד את הנושא לעומק ומסודר. קרא מההתחלה לסוף. כל פרק בנוי על קודמו.

מסלול: 1 → 2 → ... → 26 ברצף

ממונה אנרגיה

ממונה / מבקר אנרגיה

אתה מחפש חיסכון ועמידה ברגולציה. תתמקד בנצילות, בבדיקות, ב-VFD ובכלכלת מחזור החיים.

מסלול: 4 → 19 → 23 → 25 → 26

סימונים בספר

תיבת בקצרה בראש כל פרק נותנת את התמצית. תיבות נוסחה מרכזות את החישוב. תיבות דוגמה מהשטח מראות חישוב מלא עם מספרים. תיבות אדומות הן אזהרות, וירוקות הן המלצות מעשיות. מושג חדש מופיע תמיד בעברית ובאנגלית, למשל מאיץ (*impeller*).

מבנה הספר

System & selection	ו' תכן ובחירה	Fundamentals	א' יסודות
160 עקום המערכת ונקודת העבודה	16	11 מבוא: המשאבה הצנטריפוגלית בעולם המים והאנרגיה	1
168 בחירת משאבה לפי נקודת תפעול	17	19 מכניקת זורמים למשאבות	2
177 עבודה במקביל ובטור	18		
Drives & energy	ז' הנעה, בקרה ואנרגיה	How it works	ב' איך עובדת משאבה
187 מנועים והנעה	19	28 העברת אנרגיה והתאוריה ההידראולית	3
195 המנוע לעומק: בנייה, בידוד והישרדות מול הממיר	20	35 איבודים ונצילות	4
208 ויסות ספיקה: VFD מול שניקה מול חיתוך מול עוקף	21	Construction	ג' מבנה ורכיבים
217 מעברים ובטיחות הידראולית	22	45 מאיצים וגופי משאבה	5
O&M & testing	ח' התקנה, אחזקה ובדיקות	55 צירים, מסבים, מצמדים ותושבות	6
228 התקנה והרצה	23	64 אטימת ציר	7
237 תפעול, אחזקה וניטור מצב	24	73 דחף צירי ורדיאלי ואיזונו	8
247 בדיקות נצילות ותקנים	25	81 חומרים, קורוזיה ושחיקה	9
256 איתור תקלות	26	90 טבעות שחיקה: מרווח, חומרים והיתקעות	10
Economics & future	ט' כלכלה, רגולציה ועתיד	Pump types	ד' טקסונומיה
266 כלכלת אנרגיה ועלות מחזור-חיים	27	105 סיווג לפי מהירות סגולית וגיאומטריה	11
275 נוף התקנים והעתיד	28	114 משפחות המשאבות, אחת לאחת	12
		Performance	ה' ביצועים ועקומות
		133 עקומות מאפיין	13
		144 חוקי הדמיות, חיתוך מאיץ ומהירות סגולית	14
		152 NPSH וקוויטציה	15

284		טבלאות המרת יחידות	A
291		תכונות מים מול טמפרטורה	B
295		מקדמי חיכוך ואיבודי אביזרים	C
300		דף נוסחאות מרוכז	D
305		מילון מונחים עברי-אנגלי	E
313		רשימות תיוג	F

רשימת התרשימים

כל התרשימים בספר, לפי סדר הופעתם. מספר העמוד מימין לשם.

איור 1.1	חתך משאבה צנטריפוגלית מסוג יניקה-קצה (end-suction).	12
איור 1.2	שרשרת המים והאנרגיה, מהקידוח אל הצרכן.	14
איור 2.1	העומד הכולל הוא סכום של שלושה רכיבים: עומד גובה (טורקיז)...	21
איור 2.2	קו האנרגיה (EGL, זהב) הוא העומד הכולל לאורך הצינור, והוא...	21
איור 3.1	משולשי מהירות בכניסה (1) וביציאה (2).	29
איור 3.2	מסלול חלקיק מים דרך המאיץ, מבט חזיתי עם רבע גזור: הכיסוי...	30
איור 3.3	שלוש משפחות הלהבים (בצלמיות למעלה, עם כיוון הסיבוב)...	32
איור 4.1	עקום הנצילות מול הספיקה הוא "גבעה".	37
איור 4.2	מפל ההספק: לאן הולך כל אחוז.	38
איור 5.1	שלושת סוגי המאיצים בחתך אורך דרך ציר הסיבוב.	46
איור 5.2	גוף לשון (volute, משמאל) מול גוף מפזר (diffuser, מימין).	49
איור 5.3	עומס רדיאלי מול ספיקה, לשלוש גישות הגוף.	50
איור 5.4	נתיב הנזילה הפנימית בחתך אורך (חצי עליון).	52
איור 6.1	חתך רכבת ההנעה במשאבה אופקית עם מאיץ תלוי: המים (כחול)...	56
איור 6.2	שלושת רכיבי אי-היישור בין ציר המנוע (אפור) לציר המשאבה...	60
איור 7.1	חתך אטם מכני, בקידוד צבע: כחול = צד הנוזל בלחץ, לבן = צד...	65
איור 7.2	שתי השיטות זו מול זו, באותו קידוד צבע (כחול = נוזל בלחץ).	68
איור 8.1	מקור הדחף הצירי ושלוש שיטות איון, בחתך.	75
איור 9.1	מפת נק על מאיץ אחד, ארבע חתימות בלאי בקידוד צבע.	82
איור 10.1	חתך דרך אזור עין המאיץ, במקום שבו יושבת טבעת השחיקה.	91
איור 10.2	שתי עלויות מנוגדות שנקבעות ממרווח טבעת השחיקה.	94
איור 10.3	האם החומר מנצח את החול? קו אדום מקווקו מסמן את קושי גרגרי...	97
איור 10.4	שתי ארכיטקטורות של טבעות שחיקה זו מול זו.	101
איור 11.1	ספקטרום מהירות סגולית בחתכים מרידיונליים.	108
איור 11.2	צורת העקומות מול מהירות סגולית: עומד (טורקיז), הספק (זהב)...	109
איור 12.1	שלוש דרכי ההתקנה שמסבירות חצי מהטקסונומיה.	115
איור 12.2	חתך חזיתי של end-suction.	116
איור 12.3	מבט מלמעלה על מישור הפיצול.	118
איור 12.4	טורבינה אנכית עם ציר ארוך.	119
איור 12.5	משאבת קידוח טבולה בתוך דיפון הקידוח.	121
איור 12.6	משאבת ביוב טבולה בבריכה רטובה.	122
איור 12.7	משאבה רב-שלבית מסוג ring-section בחתך אורך.	124
איור 12.8	רב-שלבית אנכית אינ-ליין.	125
איור 12.9	סחרור אינ-ליין בחתך.	126
איור 12.10	עקרון ההצפה העצמית בחתך.	127
איור 12.11	משאבה אקסיאלית בחתך.	128
איור 13.1	גיליון ביצועים מלא של משאבה אחת, ארבע עקומות מעל ציר...	136
איור 13.2	עקום שטוח (flat) מול תלול (steep), אותו שינוי לחץ, שתי...	142
איור 14.1	משפחת עקומות של אותה משאבה בשלוש מהירויות: 50 Hz (טורקיז)...	146
איור 15.1	מאזן האנרגיה בצד היניקה כמפל מדרגות, לפי דוגמה 15.1.	154

219	איור 22.1	מסע הגל בקו עולה אחרי נפילת מתח, עם קידוד צבע של הלחץ...	157	איור 15.2	המספריים של הקוויטציה.
219	איור 22.2	שלושה שסתומים אל-חוזרים בחתך, באותו קו זרימה (כחול = ...)	162	איור 16.1	נקודת העבודה היא החיתוך היחיד בין עקום המשאבה (טורקיז)...
224	איור 22.3	כלי לחץ (air vessel) ביציאת המשאבה, עם קידוד צבע של הלחץ...	172	איור 17.1	אותה מערכת (כחול מקווקו), שתי בחירות.
230	איור 23.1	שלושת מצבי המצמד במבט צד.	179	איור 18.1	שתי משאבות זהות במקביל.
231	איור 23.2	צנרת יניקה בחתך, נכון מול שגוי.	183	איור 18.2	שתי משאבות זהות בטור.
241	איור 24.1	סרגל אזורי הרעידות לפי ISO 10816-7 / 20816-7, קטגוריה II...	189	איור 19.1	עקום המומנט-מהירות של מנוע השראה (טורקיז) מול מומנט העומס...
241	איור 24.2	נקודות המדידה במשאבה אנכית: בית המסב העליון (NDE, נקודה)...	193	איור 19.2	זרם ההתנעה ביחס לזרם העבודה (FLC) בארבע שיטות.
251	איור 25.1	חמש נקודות הבדיקה מדוגמה 25.1 (נקודות זהב ממוספרות, עם)...	196	איור 20.1	לאן הולך ה-100%.
257	איור 26.1	עץ אבחון לתסמין "אין ספיקה או ספיקה נמוכה".	197	איור 20.2	נצילות (טורקיז) ומקדם הספק (זהב) מול אחוז העומס.
267	איור 27.1	התפלגות עלות מחזור החיים של משאבת מים טיפוסית על פני 15...	198	איור 20.3	מנוע ציר חלול אנכי (VHS).
267	איור 27.2	עלות מצטברת לאורך הזמן, על נתוני דוגמה 27.1.	200	איור 20.4	תקציב הטמפרטורה לפי דרגה.
			202	איור 20.5	החזרת גל.
			203	איור 20.6	מנגנון זרמי המיסבים.
			211	איור 21.1	אותה הורדת ספיקה מ-Q ₁ ל-Q ₂ , בשני לוחות.



חלק ראשון

יסודות

Fundamentals

1 מבוא: המשאבה הצנטריפוגלית בעולם המים והאנרגיה

2 מכניקת זורמים למשאבות

1 מבוא: המשאבה הצנטריפוגלית בעולם המים והאנרגיה

Introduction: The Centrifugal Pump in the Water & Energy World

בקצרה

משאבה צנטריפוגלית הופכת אנרגיה מכנית מסתובבת לאנרגיה של נוזל בתנועה. גלגל מסתובב בשם **מאיץ** זורק את המים החוצה בכוח צנטריפוגלי, וגוף המשאבה אוסף אותם וממיר את המהירות ללחץ.

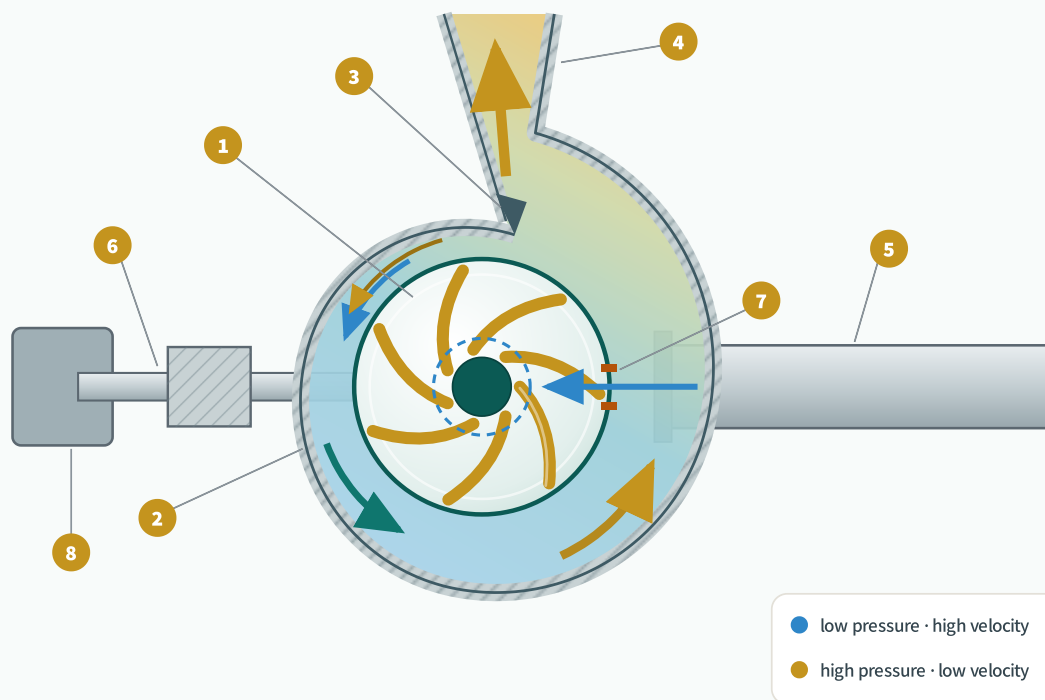
זה הסוג הנפוץ ביותר של משאבה בעולם, והוא מניע כמעט את כל מערכות המים והאנרגיה בישראל. הפרק הזה מציג את העיקרון, את הרכיבים העיקריים, ואת המקומות שבהם תפגוש את המשאבה הזו בשטח.

מה היא משאבה צנטריפוגלית

קח כוס מים, סובב אותה מהר, והמים ייצמדו לדופן ויטפסו כלפי מעלה. זה בדיוק העיקרון. משאבה צנטריפוגלית עושה את אותו דבר, רק בצורה מבוקרת ורציפה.

בלב המשאבה יושב **מאיץ** (*impeller*), גלגל עם להבים מעוקלים שמסתובב במהירות גבוהה. הנוזל נכנס במרכז המאיץ, באזור שנקרא **עין היניקה** (*eye*), והלהבים זורקים אותו כלפי חוץ בכוח צנטריפוגלי. בקצה המאיץ למים יש מהירות גבוהה, ולחץ שכבר עלה משמעותית מאז הכניסה; יותר ממחצית מעליית הלחץ מתרחשת בתוך המאיץ עצמו, והשאר אגור עדיין כאנרגיית מהירות.

כאן נכנס **גוף המשאבה** (*casing*). הוא בנוי כתעלה מתרחבת בצורת חילזון, **גוף הלשון** (*volute*). ככל שהמים מתקדמים בתעלה המתרחבת, הם מואטים, והמהירות הופכת ללחץ. זה העיקרון של ברנולי, שנעמיק בו בפרק 2. בסוף התהליך המים יוצאים מפתח ה**סניקה** (*discharge*) בלחץ גבוה, מוכנים לטפס במעלה הצינור.



1 impeller · 2 volute casing · 3 cutwater · 4 discharge nozzle
5 suction inlet · 6 shaft & bearing · 7 wear ring · 8 drive end

איור 1.1 · חתך משאבה צנטריפוגלית מסוג יניקה-קצה (end-suction). המים נכנסים דרך היניקה (5) אל עין המאיץ, המאיץ (1) זורק אותם אל התעלה הספירלית של גוף הלשון שמתרחבת לאורך הזרימה (2) וממירה מהירות ללחץ, והם יוצאים דרך פתח הסניקה (4). קידוד הצבע הוא הפיזיקה עצמה: כחול = הלחץ הנמוך בכניסה; זהב = הלחץ הגבוה לקראת היציאה. המפריד (3) מפריד בין התעלה לפתח היציאה, טבעת השחיקה (7) שומרת על המרווח בין המסתובב לנייח, והציר (6) מעביר את ההספק מצד ההנעה (8).

מבנה מפורט בפרקים 5 עד 8

סיור מודרך: לתת שם לכל חלק

לפני שממשיכים, כדאי לעצור ולתת שם לכל רכיב שראינו באיור 1.1. ההבחנה החשובה היא בין החלקים **המסתובבים**, שנעים יחד עם הציר, לבין החלקים ה**הנייחים**, שמהווים את שלד המשאבה. רק שני רכיבים עושים את העבודה ההידראולית, המאיץ והגוף, וכל היתר קיים כדי לאטום, למסב ולהחזיק אותם במקום. אחרי הקריאה הזו תוכל לפרק משאבה בעיניים ולקרוא בשם לכל חלק שתפגוש.

מאיץ *impeller* ·

הגלגל המסתובב עם הלהבים המעוקלים. הרכיב היחיד שמוסיף אנרגיה לנוזל. בעברית מקצועית קוראים לו **מאיץ**, לא "אימפלר".

עין היניקה *suction eye / inlet* ·

הפתח המרכזי שדרכו הנוזל נכנס למאיץ, במקביל לציר הסיבוב. כאן הלחץ הוא הנמוך ביותר במשאבה, ולכן זה האזור הרגיש לקוויטציה (פרק 14).

גוף המשאבה / גוף הלשון *casing / volute* ·

המעטפת הנייחת שעוטפת את המאיץ. תעלת גוף הלשון מתרחבת בהדרגה ואוספת את הנוזל, וכך ממירה את מהירותו ללחץ.

לשון / מפריד *cutwater / tongue* ·

הנקודה שבה הספירלה "נסגרת" על עצמה ומפרידה בין הנוזל שכבר עשה סיבוב מלא לבין זה שרק מתחיל. נקודה הנדסית רגישה לרעש ולשחיקה.

סניקה *discharge / outlet* ·

פתח היציאה. כאן הנוזל עוזב את המשאבה בלחץ הגבוה ביותר, מוכן לטפס במעלה הצינור.

ציר *shaft* ·

המוט הפלדה שמעביר את מומנט הסיבוב מהמנוע אל המאיץ. נישא על מסבים ואטום במקום שבו הוא חוצה את הגוף.

טבעת שחיקה *wear ring* ·

טבעת מתכת זולה ומתחלפת ששומרת על מרווח קטן בין המאיץ המסתובב לגוף הנייח, וכך מגבילה את הנזילה הפנימית בחזרה ליניקה (פרק 5).

מסתובב מול נייח · הבחנה שמלווה את כל הספר

שני חלקים בלבד **מסתובבים**: הציר והמאיץ שמורכב עליו. כל היתר, הגוף על תעלת גוף הלשון שלו, טבעת השחיקה הנייחת שבגוף (במשאבות רבות יש גם טבעת נגדית מסתובבת על המאיץ), האטום ובתי המסבים, **נייח**. כשמשוהו משתבש במשאבה, השאלה הראשונה של המאבחן היא תמיד באיזה צד מדובר. נזילה חיצונית ורעש מחזורי שייכים לרוב לחלק המסתובב ולאטום, בעוד שירידת נצילות שקטה שייכת למרווח שבין המסתובב לנייח, כלומר לטבעת השחיקה.

היכן פוגשים אותה בישראל

המשאבה הצנטריפוגלית נמצאת בכל מקום שבו צריך להזיז נוזל. בישראל היא עומדת בלב כל שרשרת המים והאנרגיה, מהקידוח ועד הברז ובחזרה.

1 הפקה מקידוחים

1

משאבות טורבינה אנכיות טבולות מרימות מים ממאות מטרים מתחת לאדמה. צרכניות החשמל הגדולות ביותר ברשת המים.

2 הולכה והגברת לחץ

2

משאבות בוסטר ומשאבות פיצול דוחפות מים בין מאגרים, בקווי הולכה ובתחנות הגברה לאזורי לחץ.

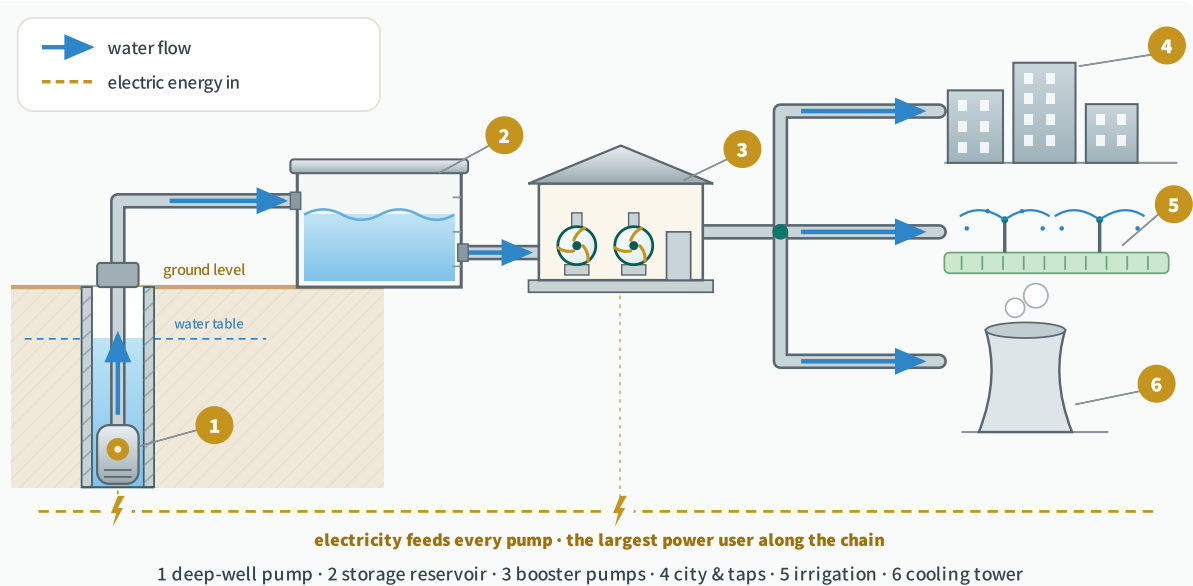
3 חקלאות והשקיה

הזרמת מים וקולחים לשדות, לרוב בלוח זמנים עונתי שמתאים לתעריף החשמל.

4 תעשייה, קירור וביזב

סחרור מים במערכות קירור, הזנת דודים, ושאיבת שפכים במשאבות עם מאיץ פתוח שלא נסתר.

אם נמתח את ארבעת השלבים האלה על קו אחד, נקבל את שרשרת המים והאנרגיה הישראלית כפי שהיא נראית בשטח: מהמים שבאדמה ועד הברז, השדה ומגדל הקירור. כמעט בכל חץ בשרשרת הזו יושבת משאבה צנטריפוגלית.



איור 1.2 · שרשרת המים והאנרגיה, מהקידוח אל הצרכן. משאבה טבולה בקידוח (1) מרימה מים מתחת למפלס מי התהום אל מאגר אגירה (2), תחנת בוסטר (3) מגבירה לחץ, ומשם המים מתפצלים אל העיר (4), אל ההשקיה (5) ואל מערכות הקירור (6). קידוח הצבע: חיצים כחולים = זרימת המים, והקו הזהוב המקווקו = החשמל שמזרם לכל משאבה בדרך. שרשרת השאיבה הזו היא צרכנית האנרגיה הגדולה במערכת המים.

סכמטי · להמחשת זרימת המים והאנרגיה, לא בקנה מידה

למה זה חשוב כל כך

שאיבת מים היא אחת מצרכניות החשמל הגדולות במשק. משאבה אחת בקידוח עמוק יכולה לצרוך מאות אלפי שקלים בחשמל בשנה. הבדל של חמישה אחוזים בנצילות שווה כסף אמיתי, חודש אחר חודש. לכן הבנה של המשאבה אינה רק עניין הנדסי, אלא כלכלי וסביבתי ממדרגה ראשונה.

ההימור: כמה חשמל באמת שותה משאבה

קל לדבר על נצילות כשל מושג מופשט. כדי להבין למה מהנדסי אנרגיה מתעקשים עליה, צריך לתרגם אותה לכסף. נעשה זאת בעזרת חישוב פשוט אחד, שמלווה כמעט כל בדיקת נצילות

שתי הנוסחאות שמחברות בין הזרימה לבין החשמל הן בלב הספר, ונפגוש אותן שוב ושוב.
ההספק ההידראולי, האנרגיה שבאמת נמסרת למים, וה**הספק החשמלי**, מה שהמונה סופר.
 היחס ביניהם הוא הנצילות הכוללת.

נוסחה 1.1 • הספק הידראולי וחשמלי

$$P_h = Q \cdot H / 367 \quad P_1 = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \cos \varphi / 1000$$

P_h	ההספק ההידראולי שנמסר לנוזל [kW]. הקבוע 367 כולל את צפיפות המים וגרביטציה כשמזינים Q ב-m ³ /h ו-H ב-m.
Q, H	ספיקה [m ³ /h] ועומד [m] בנקודת העבודה.
P_1	ההספק החשמלי הנשאב מהרשת [kW], תלת-פאזי.
$U, I, \cos \varphi$	מתח [V], זרם [A] ומקדם ההספק. נמדדים בשטח עם מד זרם צבת ומד מתח.

דוגמה 1.1 • כמה עולה משאבת קידוח אחת בשנה

קידוח מים טיפוסי מפעיל משאבה טבולה שמושכת מהרשת כ-75 kW חשמל. הקידוח עובד כמעט ברצף לאורך עונת ההשקיה, כ-6,000 שעות בשנה. מה עלות החשמל השנתית, וכמה היא משתנה אם נשפר את הנצילות בחמש נקודות אחוז?

$$P_1 = 75 \text{ kW} \quad \text{hours} = 6,000 \text{ h/yr} \quad \text{rate} = 0.40 \text{ ש"ח / kWh (מתח גבוה, ללא מע"מ)}$$

1 צריכת החשמל השנתית = הספק כפול שעות:

$$E = 75 \text{ kW} \times 6,000 \text{ h} = 450,000 \text{ kWh/yr}$$

2 עלות שנתית = צריכה כפול תעריף:

$$\text{Cost} = 450,000 \times 0.40 = 180,000 \text{ ש"ח / yr}$$

3 שיפור נצילות ב-5 נקודות אחוז (למשל מ-65% ל-70%) חוסך בקירוב 7.1% ≈ 5/70 מהחשמל:

$$\text{Saving} \approx 180,000 \times 0.071 \approx 12,800 \text{ ש"ח / yr}$$

תוצאה: משאבה אחת עולה כ-**180,000 ש"ח** חשמל בשנה. חמש נקודות נצילות שוות כ-12,800 ש"ח בשנה, **ממשאבה אחת בלבד**. בתחנה עם חמש משאבות זה כבר מעל 60,000 ש"ח בשנה.

המספרים האלה הם שמסבירים למה מדידת נצילות מחזירה את עצמה תוך חודשים, ולמה המדינה מחייבת מתקנים גדולים בבדיקה תקופתית. הקבוע 367 והנוסחאות שמאחורי החישוב מפורטים בפרק 4, התעריף לפי מתח בפרק 26, ובדיקת הנצילות עצמה בפרק 24.

הסדר הנכון של הגדלים

שים לב להיררכיה. החשמל שהמונה סופר (P_1) תמיד גדול מההספק שבאמת נמסר למים (P_h), כי המנוע, המאיץ והדליפות "אוכלים" בדרך. היחס $\eta = P_h / P_1$ הוא הנצילות הכוללת, ובמשאבות מים טיפוסיות הוא נע בין 55%-ל-80%. כל נקודת אחוז שמאבדים היא חשמל ששולמה עבורו אך הומר לחום ולרעש במקום ללחץ. זו בדיוק המטרה של רוב הספר הזה: להבין היכן הולכת לאיבוד כל נקודה, וכיצד להחזיר אותה.

רוטו-דינמית מול נפח-חיובי

לפני שנצלול, חשוב למקם את המשאבה הצנטריפוגלית במשפחה הגדולה של המשאבות. יש שתי משפחות עיקריות, והספר הזה עוסק רק באחת מהן.

נפח-חיובי (מחוץ לתחום)

- כולאת נפח קבוע ודוחפת אותו (בוכנה, בורג, גלגלי שיניים)
- ספיקה כמעט קבועה ללא תלות בלחץ
- לחצים גבוהים מאוד, ספיקות נמוכות, נוזלים צמיגים
- נדון רק כהשוואה, בפרק 11

רוטו-דינמית (הספר הזה)

- מאיץ מסתובב שמעניק אנרגיה רציפה לנוזל
- ספיקה משתנה עם הלחץ לפי עקום מאפיין
- ספיקות גבוהות, לחצים בינוניים, זרימה חלקה
- צנטריפוגלית, רדיאלית, מעורבת ואקסיאלית

בקיצור, אם צריך להזיז כמות גדולה של מים בלחץ סביר, כמעט תמיד הבחירה תהיה משאבה צנטריפוגלית. כל שאר הספר מוקדש לה.

מפת הספר: תשעה חלקים, שלושה מסלולים

הספר בנוי כמסע הגיוני, מהעיקרון הפיזיקלי ועד הכלכלה והרגולציה. תשעת החלקים נבנים זה על זה, אך אינך חייב לקרוא הכל לפי הסדר. הטבלה הבאה היא מפת הדרך, ואחריה שלושה מסלולי קריאה לפי התפקיד שלך.

חלק	נושא	מה תמצא בו
א'	יסודות	העיקרון, מכניקת זורמים, עומד ולחץ (פרקים 1 עד 2)
ב'	איך עובדת משאבה	תורת המאיץ, משולשי מהירויות, אנרגיה ואיבודים (פרקים 3 עד 4)
ג'	מבנה ורכיבים	מאיצים, גופים, צירים, מסבים, אטמים, דחף וחומרים (פרקים 5 עד 9)
ד'	טקסונומיה	סוגי המשאבות: בור, פיצול, רב-שלבי, ביוב ועוד (פרקים 10 עד 11)
ה'	ביצועים ועקומות	עקומות מאפיין, חוקי דמיות, NPSH וקוויטציה (פרקים 12 עד 14)
ו'	תכן ובחירה	חיבור משאבות, התאמה לנקודת עבודה, תכן מערכת (פרקים 15 עד 17)
ז'	הנעה, בקרה ואנרגיה	מנועים והנעה, המנוע לעומק, ויסות ספיקה וממירי תדר (VFD), מעברים ובטיחות הידראולית (פרקים 18 עד 21)
ח'	התקנה, אחזקה ובדיקות	התקנה והרצה, תפעול וניטור מצב, בדיקות נצילות, איתור תקלות (פרקים 22 עד 25)
ט'	כלכלה, רגולציה ועתיד	עלות מחזור-חיים, תעריפים ורגולציה, מבט קדימה (פרקים 26 עד 27)

ממונה האנרגיה

מי שאחראי על חשבון החשמל

התמקד בנצילות, באיבודים, בתעריפים וברגולציה. דוגמה 1.1 כאן היא כרטיס הכניסה שלך לכל היתר.

מסלול: 1 → 4 → 12 → 19 → 25

המהנדס והמתכנן

מי שבוחר ומתכנן משאבות

קרא את הספר לפי הסדר. החלקים על מכניקת זורמים, עקומות, חוקי דמיות ובחירת משאבה הם הליבה המקצועית שלך.

מסלול: 1 → 2 → 3 → 4 → 5 → 6

הסטודנט והסקרן

מי שרוצה להבין מהיסוד

חלק א' וחלק ב' נותנים את כל הפיזיקה. משם אפשר לבחור כל נושא שמסקרן, כל פרק עומד בפני עצמו.

מסלול: 1 → 2 → 3 → 4 → 12

מנהל האחזקה

מי שמתחזק את המתקן בשטח

המבנה, המסבים, האטמים, טבעות השחיקה, אבחון תקלות ובדיקות הם הלחם והחמאה היומיומי שלך.

מסלול: 1 → 5 → 9 → 22 → 23

אז מה? שלושה רכיבים, עיקרון אחד, והרבה כסף שתלוי בנקודות אחוז. מאיץ שזורק את הנוזל, גוף לשון שאוסף אותו וממיר מהירות ללחץ, וציר שמעביר את הכוח מהמנוע. כל מה שנלמד מכאן ואילך, מעקומות ביצועים ועד נצילות ותחזוקה, בנוי על שלושת הרכיבים האלה. וכפי שראינו, משאבה אחת יכולה לשתות 180,000 ש' חשמל בשנה, ולכן כל נקודת נצילות שמבינים כאן מתורגמת ישירות לשקלים בשטח.

מכניקת הזורמים שמאחורי העומד והלחץ בפרק 2. תורת המאיץ והאיבודים, כולל הקבוע 367 והנצילות הכוללת, בפרק 4. מבנה הרכיבים שראינו בסיור המודרך מפורט בפרקים 5 עד 9. עקומות המאפיין בפרק 12, וקוויטציה בעין היניקה בפרק 14. בדיקת הנצילות שמודדת בפועל את דוגמה 1.1 בפרק 24, והתעריף לפי מתח והכלכלה בפרק 26. אם אתה מנהל אחזקה או ממונה אנרגיה שרוצה ישר לעניין, בחר את המסלול המומלץ שלך מטבלת "מפת הספר" ומכרטיסי התפקידים שלמעלה.

2 מכניקת זורמים למשאבות

Fluid Mechanics for Pumps

בקצרה

כל מה שמשאבה עושה אפשר לתרגם לשפה אחת: **עומד** (head), אנרגיה לכל יחידת משקל של נוזל, הנמדדת במטרים. לחץ, מהירות וגובה הם שלוש צורות של אותה אנרגיה, ומשוואת ברנולי קושרת ביניהן.

הפרק הזה נותן את ארגז הכלים: עומד מול לחץ, ברנולי ואיבודים, מספר ריינולדס, צמיגות ולחץ אדים. בסופו טבלאות המרת יחידות שתחזור אליהן שוב ושוב.

עומד, לחץ והקשר ביניהם

מהנדסי משאבות כמעט לא מדברים בלחץ. הם מדברים ב**עומד**, כלומר בגובה עמוד המים. זו לא גחמה, זו בחירה חכמה.

הסיבה פשוטה. עמוד מים בגובה נתון מפעיל אותו לחץ בלי קשר לרוחב הצינור או לכמות המים. מטר אחד של מים שווה תמיד לאותו לחץ. וחשוב מכך, העומד שמשאבה מייצרת כמעט אינו תלוי בצפיפות הנוזל, בעוד שהלחץ כן. לכן עקום המשאבה מצויר תמיד בעומד (מטרים), לא בלחץ (בר).

נוסחה 2.1 • לחץ ועומד

$$p = \rho \cdot g \cdot H \quad \Leftrightarrow \quad H = p / (\rho \cdot g)$$

p	לחץ [Pa]. מים: $1 \text{ bar} \approx 10.2 \text{ m}$.
ρ	צפיפות הנוזל [kg/m^3]. מים קרים ≈ 1000 .
g	תאוצת הכובד $= 9.81 \text{ m/s}^2$.
H	עומד, גובה עמוד הנוזל [m].

כלל אצבע בשטח

עשרה מטר של מים שווים בערך לבר אחד ($10 \text{ m} \approx 1 \text{ bar}$). אם מד הלחץ בסניקה מראה 6 bar ולחץ היניקה זניח, המשאבה מייצרת בערך 60 m עומד. זה הקירוב שמלווה כל בדיקת שדה.

הקירוב $10 \text{ m} \approx 1 \text{ bar}$ נוח, אך מד הלחץ בשטח מודד **לחץ יחסי** (*gauge pressure*), כלומר מעל הלחץ האטמוספרי, ולא **לחץ מוחלט** (*absolute*). בחישוב עומד המשאבה זה לא מפריע, כי גם בצד היניקה וגם בצד הסניקה האטמוספירה מתבטלת. אבל בחישוב NPSH (פרק 14) ההבדל

קריטי, כי שם משווים מול לחץ האדים המוחלט. כלל הברזל: עומד משאבה מחושב מהפרשי לחץ יחסי, NPSH מחושב בלחץ מוחלט.

דוגמה 2.1 • ממד לחץ בסניקה לעומד מדויק

בבדיקת שדה מד הלחץ בצד הסניקה של משאבה מראה 6.0 bar, ומד היניקה מראה 0.4 bar. שני המדים על אותו גובה. מה העומד שהמשאבה מייצרת בפועל, ומתי נכון להזניח את הקירוב המהיר?

$$g = 9.81 \text{ m/s}^2 \quad \rho = 1000 \text{ kg/m}^3 \quad p_{\text{suct}} = 0.4 \text{ bar} \quad p_{\text{disch}} = 6.0 \text{ bar}$$

1 הפרש הלחץ על פני המשאבה הוא ההפרש בין הסניקה ליניקה:

$$\Delta p = 6.0 - 0.4 = 5.6 \text{ bar} = 560 \text{ kPa}$$

2 נמיר לעומד לפי נוסחה 2.1, $H = p / (\rho \cdot g)$, עם $1 \text{ bar} = 10.20 \text{ m}$ מטבלה 2.3:

$$H = 5.6 \times 10.20 = 57.1 \text{ m}$$

3 בדיקה ישירה בפסקלים: $H = 560000 / (1000 \times 9.81) = 57.1 \text{ m} \checkmark$

4 השוואה לקירוב המהיר (10 m/bar): סטייה 1.9% $5.6 \times 10 = 56.0 \text{ m} \rightarrow 1.9\%$

תוצאה: העומד המדויק הוא **57.1 m**. הקירוב המהיר נתן 56.0 m, סטייה של פחות מ-2%. **לאומדן שדה הקירוב מצוין, אך לדוח רשמי או לחישוב נצילות השתמש ב-10.20 m/bar.**

שים לב להפרש הגבהים בין המדים. אם מד היניקה ומד הסניקה אינם באותו גובה, מוסיפים להפרש הלחץ גם את הפרש הגובה ביניהם. בבדיקת נצילות תקנית (פרק 24) זה תיקון מקובל שמונע טעות של מטר-שניים בעומד.

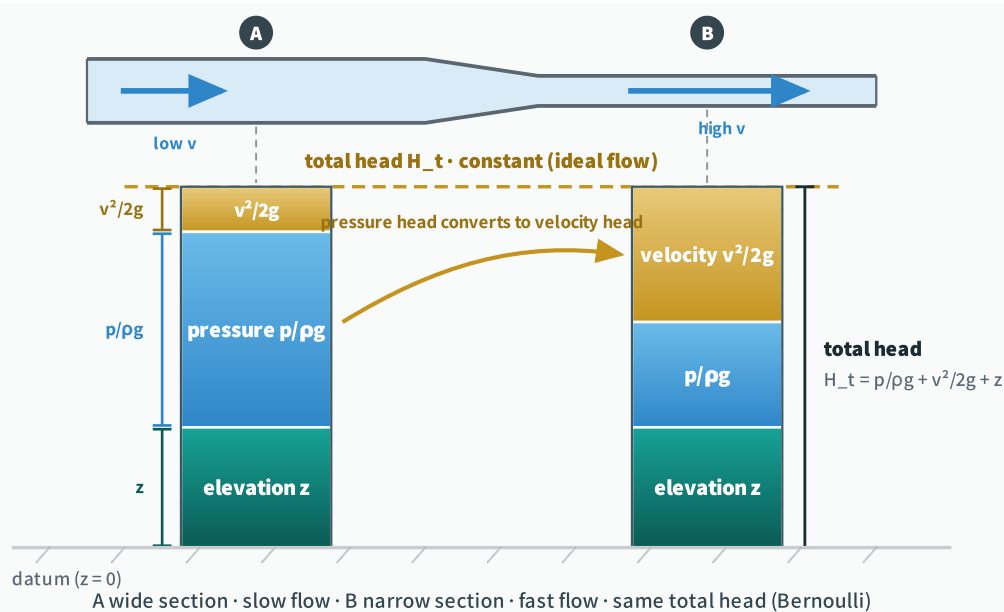
משוואת ברנולי: שלוש צורות של אותה אנרגיה

לנוזל זורם יש אנרגיה בשלוש צורות. אנרגיית לחץ, אנרגיה קינטית של מהירות, ואנרגיית מיקום של גובה. ברנולי אומר שבזרימה אידאלית הסכום שלהן, **העומד הכולל** (*total head*), נשמר.

$$H_t = p/(\rho g) + v^2/(2g) + z$$

$p/\rho g$	עומד לחץ (pressure head). האנרגיה האגורה בלחץ.
$v^2/2g$	עומד מהירות (velocity head). האנרגיה שבתנועה.
z	עומד גובה (elevation head). האנרגיה שבמיקום.

בעולם האמיתי יש חיכוך. לכן בין שתי נקודות בצנרת, העומד הכולל יורד בדיוק בגובה ה
איבודים (head loss). תפקיד המשאבה הוא להזריק חזרה את העומד שאבד ועוד, כדי להרים
את הנוזל וליצור לחץ. את חישוב האיבודים נפרק בפרק 15.



איור 2.1 • העומד הכולל הוא סכום של שלושה רכיבים: עומד גובה (טורקיז), עומד לחץ (כחול) ועומד מהירות (זהב). בזרימה אידאלית הסכום נשמר: בחתך הרחב A המהירות נמוכה ורוב העומד אגור בלחץ, ובחתך הצר B המהירות קופצת, ועומד הלחץ קטן בדיוק בכמות שעומד המהירות גדל. הקו הזהוב המקווקו מראה שהגובה הכולל של שתי העמודות זהה.

עומד המהירות: הרכיב שנשכח

מבין שלושת הרכיבים, עומד המהירות $v^2/2g$ הוא הקטן ביותר במים בצנרת רגילה, ולכן נוטים להזניח אותו. זה בדרך כלל מוצדק: במהירות זרימה אופיינית של 1.5 m/s עומד המהירות הוא רק 0.11 m , טיפה בים מול עשרות מטרים של עומד לחץ. אבל יש מקרה אחד שבו הוא קובע הכול, צד היניקה של המשאבה. שם הנוזל מואץ אל עין היניקה, עומד המהירות קופץ, ולפי ברנולי עומד הלחץ צונח בדיוק באותו שיעור. אם הלחץ צונח עד לחץ האדים, מתחילה קוויטציה. כך הרכיב הקטן ביותר במאזן האנרגיה הופך לשחקן הראשי בפרק 14.

טבלה 2.1 • עומד מהירות מול מהירות זרימה (כלי עזר)

הערכה הנדסית	$V^2/2g$ (M)	V (M/S)
איטי, מומלץ לקווי יניקה	0.05	1.0
טיפוסי לקו סניקה במים	0.11	1.5
גבול עליון נוח	0.20	2.0
מהיר, איבודי חיכוך מטפסים	0.46	3.0
גבוה מאוד, שחיקה ורעש	1.27	5.0

למה מהירות יניקה חייבת להישאר נמוכה

בקו הסניקה מהירות גבוהה רק "עולה כסף" באיבודי חיכוך. בקו היניקה מהירות גבוהה **מסוכנת**, כי כל עלייה במהירות מורידה את הלחץ המקומי ומקרבת לקוויטציה. זו הסיבה שצינור יניקה תמיד גדול בקוטר מצינור הסניקה, וזו הסיבה שכלל האצבע הנדסי מגביל את מהירות היניקה לכ-1.0–1.5 m/s לעומת כ-1.5–2.5 m/s בסניקה.

רציפות, ריינולדס וצמיגות

שני עקרונות נוספים מלווים כל חישוב צנרת. **רציפות** אומרת שמה שנכנס שווה למה שיוצא: $Q = A \cdot v$. לכן בצינור צר המים זורמים מהר יותר. **מספר ריינולדס** קובע אם הזרימה חלקה (למינרית) או מערבולתית (טורבולנטית), וזה משפיע ישירות על איבודי החיכוך.

נוסחה 2.3 • רציפות ומספר ריינולדס

$$Q = A \cdot v \quad | \quad Re = v \cdot D / \nu$$

Q	ספיקה [m^3/s]; A שטח חתך [m^2]; v מהירות [m/s].
ν	צמיגות קינמטית [m^2/s]. מים $\approx 1 \times 10^{-6}$.
Re	2300 < למינרית • 4000 > טורבולנטית. במים בצנרת כמעט תמיד טורבולנטית.

שתי הנוסחאות עובדות יחד. רציפות נותנת את המהירות מתוך הספיקה והקוטר, ומספר ריינולדס לוקח את אותה מהירות וקובע את אופי הזרימה. שטח חתך עגול הוא $A = \pi \cdot D^2 / 4$, ולכן הקוטר נכנס בריבוע, והכפלת הקוטר מורידה את המהירות פי ארבעה. זו הסיבה שהגדלת קוטר צנרת בצעד מסחרי אחד חותכת דרמטית הן את המהירות והן את איבודי החיכוך.

קו סניקה מעביר $90 \text{ m}^3/\text{h}$ מים קרים בצינור בקוטר פנימי 150 mm . מה מהירות הזרימה, ומהו מספר ריינולדס? האם הזרימה למינרית או טורבולנטית?

$$v = 1.0 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s} \quad D = 0.150 \text{ m} \quad Q = 90 \text{ m}^3/\text{h}$$

1 נמיר ספיקה ליחידות SI $[\text{m}^3/\text{s}]$ (חלוקה ב-3600):

$$Q = 90 / 3600 = 0.0250 \text{ m}^3/\text{s}$$

2 שטח חתך הצינור: $A = \pi \cdot D^2 / 4 = \pi \times 0.150^2 / 4 = 0.01767 \text{ m}^2$

3 מהירות מרציפות, $v = Q / A$: $v = 0.0250 / 0.01767 = 1.41 \text{ m/s}$

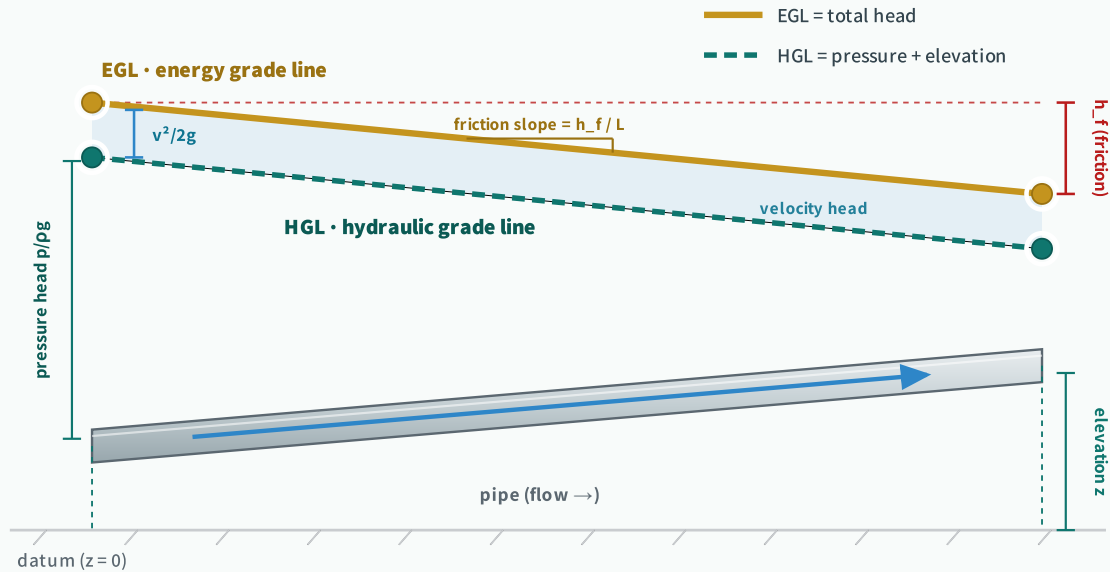
4 מספר ריינולדס, $Re = v \cdot D / \nu$:

$$Re = 1.41 \times 0.150 / 1.0 \times 10^{-6} = 212,000$$

תוצאה: המהירות **1.41 m/s** , מעט מתחת לטווח המומלץ לקו סניקה ובצד הבטוח. מספר ריינולדס $\approx 212,000$, הרבה מעל 4000, ולכן הזרימה **טורבולנטית בבירור**. כך כמעט תמיד במים בצנרת הנדסית.

מתי בכל זאת תהיה זרימה למינרית? רק כשהמכפלה $v \cdot D$ קטנה מאוד או כשהצמיגות גבוהה.

שמן בצמיגות $\nu = 1 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$, פי מאה מהמים, באותו צינור ובאותה מהירות היה נותן $Re = 2,120$, מתחת ל-2300, כלומר למינרי. זו בדיוק הנקודה שבה הצמיגות משנה את התמונה, ואליה נעבור עכשיו.



איור 2.2 · קו האנרגיה (EGL, זהב) הוא העומד הכולל לאורך הצינור, והוא יורד בהתמדה בגלל איבודי החיכוך h_f . קו הלחץ (HGL, טורקיז מקווקו) נמצא תמיד מתחתיו, והרצועה הכחולה המוצללת ביניהם היא עומד המהירות $v^2/2g$. המרחק בין ה-HGL לצינור הוא עומד הלחץ, והנקודות המודגשות מסמנות את חתכי הכניסה והיציאה. ככל שהזרימה מתקדמת, החיכוך "אוכל" עומד, וזה בדיוק העומד שהמשאבה צריכה להחזיר.

סכמטי · להמחשת מאזן האנרגיה לאורך קו זרימה

איך לקרוא את EGL ו-HGL

שני הקווים האלה הם השפה הגרפית של ברנולי. ה-EGL תמיד יורד בכיוון הזרימה (אלא אם משאבה מזריקה אנרגיה, ואז הוא קופץ למעלה). ה-HGL מקביל לו אך נמוך בעומד המהירות. כשה-HGL צולל אל מתחת לצינור, הלחץ המקומי נעשה שלילי (תת-אטמוספרי), וזה דגל אדום לקוויטציה ולכניסת אוויר. עקום המערכת של פרק 15 הוא בעצם ה-EGL הזה כפונקציה של הספיקה.

צמיגות והשפעתה על המשאבה

צמיגות (viscosity) היא ההתנגדות הפנימית של הנוזל לזרימה. מים דלילים, שמן סמיך. צמיגות גבוהה מגדילה איבודי חיכוך, מורידה את עומד ונצילות המשאבה, ומגדילה את ההספק הנדרש. בספר הזה אנו עוסקים במים, אך כשעובדים עם נוזל צמיגי חובה לתקן את עקום היצרן. הבחנה חשובה: **צמיגות דינמית** μ מול **צמיגות קינמטית** $\nu = \mu/\rho$. הנוסחאות ההידראוליות משתמשות בקינמטית.

עקומות היצרן כולן נמדדות במים. ברגע שהנוזל צמיגי יותר ממים, אותה משאבה בדיוק מספקת פחות: העומד יורד, הנצילות נופלת, וההספק על הצינור דווקא עולה כי הזרימה הצמיגה גוררת חיכוך פנימי כבד יותר. שלוש ההשפעות יחד מתוארות במקדמי תיקון, הידועים כעקומות Hydraulic Institute לתיקון צמיגות. את התיקון המלא נבצע בשלב הבחירה (פרק 16), אך כדאי להבין את כיוון התופעה כבר עכשיו.

טבלה 2.2 • כיוון תיקון הצמיגות (מים → נוזל צמיג, כלי עזר)

גודל	במים	בנוזל צמיג	מקדם תיקון
ספיקה Q	בסיס	נמוכה יותר	$C_Q \leq 1$
עומד H	בסיס	נמוך יותר	$C_H \leq 1$
נצילות η	בסיס	נמוכה משמעותית	$C_\eta \leq 1$
הספק על הציר P	בסיס	גבוה יותר	$\uparrow$

מתי הצמיגות הופכת קריטית

עד צמיגות של כ-20 cSt ($20 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$) ההשפעה זניחה ואפשר להתייחס לנוזל כמו מים. מעל כך התיקון הופך מהותי: בשמן בצמיגות 100–200 cSt הנצילות יכולה לצנוח ב-25 עד 10 נקודות אחוז, וייתכן שיידרש מנוע גדול יותר משחישוב המים הצי. הכלל: אם הנוזל אינו מים נקיים בטמפרטורת חדר, ברר את צמיגותו לפני שתסמוך על עקום היצרן. נוזל חם דווקא פחות צמיג, ולכן חימום הוא לעיתים פתרון מעשי לשאיבת שמנים כבדים.

לחץ אדים: רמז לפרק 14

תכונה רביעית של הנוזל, שלא משתתפת ישירות במאזן ברנולי אך תכריע פרק שלם בהמשך, היא **לחץ האדים** (*vapor pressure*). זהו הלחץ שבו הנוזל מתחיל לרתוח בטמפרטורה נתונה. נוזל רותח לא רק כשמחממים אותו אלא גם כשמורידים לו את הלחץ, וזו בדיוק הסכנה בצד היניקה של המשאבה.

ראינו זה עתה (טבלה 2.1) שעומד המהירות קופץ כשהנוזל מואץ אל עין היניקה. לפי ברנולי, קפיצה בעומד המהירות פירושה צניחה בעומד הלחץ באותו מקום. אם הלחץ המקומי צונח עד לחץ האדים, נוצרות בועות אדים, והן קורסות באלימות מילימטרים ספורים אחר כך כשהן נכנסות לאזור הלחץ הגבוה של המאיץ. זו **קוויטציה** (*cavitation*), והיא יכולה לכרסם מתכת, להפיל ספיקה ונצילות ובסוף להרוס את המשאבה.

למה זה כאן ולא רק בפרק 14

לחץ האדים נכנס לספר כבר בפרק היסודות כי הוא חוליה ישירה בשרשרת ברנולי: **מהירות גבוהה ביניקה → עומד מהירות גבוה → עומד לחץ נמוך → קרבה ללחץ האדים → קוויטציה**. למים קרים לחץ האדים זניח (כ-0.32 m ב-25°C), אך הוא עולה מהר עם הטמפרטורה ומגיע ל-2.0 m כבר ב-60°C. את הטבלה המלאה, את נוסחת ה-NPSH ואת חישוב שולי הביטחון תמצא בפרק 14. כאן מספיק לזכור שלחץ האדים הוא "הרצפה" שמתחתיה הלחץ בצד היניקה אסור לרדת.

טבלאות המרת יחידות (כלי עזר)

אלה הטבלאות שתחזור אליהן בכל חישוב. כל שורה היא יחידה אחת, וכל עמודה היא הערך שלה ביחידות האחרות.

טבלה 2.3 • המרת לחץ ועומד

PSI	MH ₂ O (M)	KPA	BAR	יחידה
14.50	10.20	100	1	bar 1
0.145	0.102	1	0.010	kPa 1
1.42	1	9.81	0.098	mH ₂ O 1
1	0.703	6.89	0.069	psi 1
14.70	10.33	101.3	1.013	atm 1

טבלה 2.4 • המרת ספיקה

US GPM	L/MIN	L/S	M ³ /H	יחידה
4.40	16.67	0.278	1	m ³ /h 1
15.85	60	1	3.60	L/s 1
0.264	1	0.0167	0.060	L/min 1
1	3.79	0.063	0.227	US gpm 1

שתי המרות לזכור בעל פה

$1 \text{ L/s} = 3.6 \text{ m}^3/\text{h}$ (כפל ב-3.6), ו- $1 \text{ bar} \approx 10 \text{ m}$. עם שתי אלה לבד אפשר לעבור את רוב חישובי השדה.

קישורים בספר

העומד והלחץ שלמדנו כאן הם הצירים של עקום המשאבה בפרק 12. עומד המהירות ולחץ האדים מתאחדים ל-NPSH ולקוויטציה בפרק 14. איבודי החיכוך h_f מקו ה-EGL הופכים לעקום המערכת בפרק 15. תיקון הצמיגות נכנס לבחירת משאבה בפרק 16. ומאזן ההספק $P_h = Q \cdot H / 367$, שנשען על אותו עומד, הוא לב בדיקת הנצילות בפרק 24.

אז מה? הכול עומד. ברגע שמתרגלים לחשוב במטרים של עומד במקום בבר של לחץ, כל עולם המשאבות מתבהר. עקום המשאבה, עקום המערכת, NPSH והנצילות, כולם מדברים בשפה אחת של עומד. שלוש המיומנויות של הפרק, להמיר מד לחץ לעומד מדויק, להוציא מהירות ומספר ריינולדס מהספיקה והקוטר, ולזכור שעומד המהירות הקטן הופך לשחקן הראשי בצד היניקה, הן ארגז הכלים שתפתח בכל אחד מהפרקים הבאים. שאר הספר בנוי על הבסיס הזה.



חלק שני

איך עובדת משאבה צנטריפוגלית

How a Centrifugal Pump Works

העברת אנרגיה והתאוריה ההידראולית 3

איבודים ונצילות 4

3 העברת אנרגיה והתאוריה ההידראולית

Energy Transfer & Hydraulic Theory

בקצרה

המאיץ מעניק אנרגיה לנוזל על ידי שינוי מהירותו. **משוואת אוילר** (Euler) מתרגמת את גיאומטריית הלהבים ואת מהירות הסיבוב ל**עומד תאורטי**. ככל שקצה המאיץ מהיר יותר וזורק את המים בכיוון הסיבוב, כך העומד גדול יותר.

משולשי מהירות הם הכלי לראות את זה. בעולם האמיתי **החלקה** (slip) מורידה את העומד מתחת לתאורטי, ואיבודים מורידים אותו עוד. הפרק הזה מסביר מאיפה מגיע העומד.

איך המאיץ מעניק אנרגיה

משאבה לא "דוחפת" מים בכוח. היא מאיצה אותם. ההאצה היא העברת האנרגיה.

הנוזל נכנס למרכז המאיץ במהירות נמוכה, והלהבים מגלגלים אותו ומאיצים אותו עד שהוא עוזב את הקצה במהירות גבוהה. לאונרד אוילר הראה במאה ה-18 שהעומד התאורטי תלוי רק בשינוי במכפלה של מהירות הקצה ההיקפית של המאיץ במהירות הנוזל בכיוון הסיבוב. זו **משוואת אוילר למשאבות** (Euler's pump equation).

נוסחה 3.1 · משוואת אוילר

$$H_{th} = (u_2 \cdot c_{u2} - u_1 \cdot c_{u1}) / g$$

u מהירות היקפית של המאיץ $[m/s]$: $u = \pi \cdot D \cdot n / 60$ (D קוטר, n סל"ד).

c_u רכיב מהירות הנוזל בכיוון הסיבוב $[m/s]$ (tangential).

$1, 2$ כניסה (eye) ויציאה (קצה המאיץ).

$\rightarrow$ ללא סחרור בכניסה ($c_{u1} = 0$) הנוסחה מצטמצמת ל- $H_{th} = u_2 \cdot c_{u2} / g$.

המסקנה המעשית

העומד נקבע בעיקר ממהירות הקצה u_2 . לכן קוטר המאיץ גדול יותר או סיבוב מהיר יותר נותנים יותר עומד. זה גם השורש לחוקי הדמיות (פרק 13): שינוי מהירות הסיבוב משנה את העומד בריבוע.

· **מהירות היקפית** (u) *peripheral / tip speed*

המהירות הקווית של נקודה על קצה המאיץ. $u = \pi \cdot D \cdot n / 60$. זו "המהירות הזמינה" שהמאיץ יכול להעביר לנוזל.

· **מהירות מוחלטת** (c) *absolute velocity*

מהירות הנוזל ביחס לעולם הנייח (לגוף המשאבה). מתפרקת לרכיב היקפי c_u (בכיוון הסיבוב) ולרכיב מרידיאלי c_m (רדיאלי, שאחראי לספיקה).

· **מהירות יחסית** (w) *relative velocity*

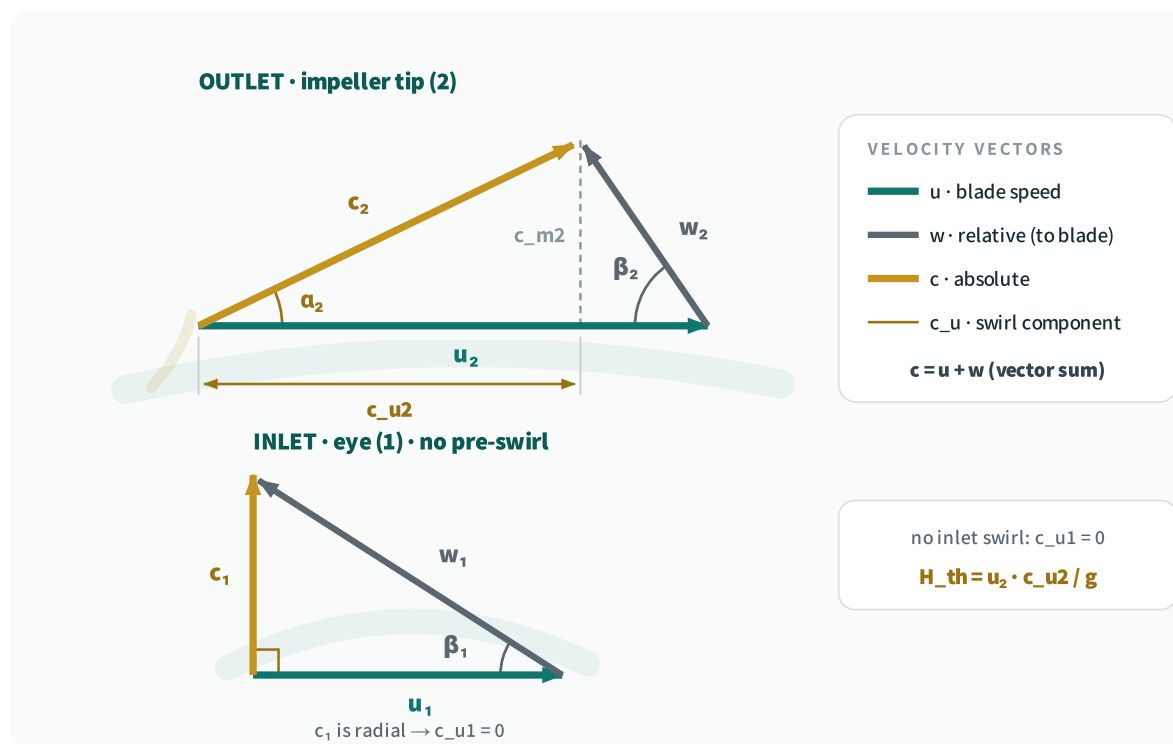
מהירות הנוזל ביחס ללהב המסתובב. היא זו שעוקבת אחר צורת הלהב, וזוויתה היא זווית הלהב.

· **עומד תאורטי** (H_{th}) *theoretical head*

העומד שאוילר מנבא למאיץ אידאלי עם אינסוף להבים וללא איבודים. זהו תקרת הביצועים, לפני שמחסירים החלקה ואיבודים.

משולשי מהירות

בכל נקודה על הלהב יש לנוזל שלוש מהירויות שקשורות זו לזו. u מהירות הלהב עצמו (היקפית), w מהירות הנוזל יחסית ללהב, ו- c המהירות המוחלטת שרואה צופה מבחוץ. הקשר פשוט: $c = u + w$ כסכום וקטורי. ציור שלושת הווקטורים הוא **משולש מהירות** (*velocity triangle*).

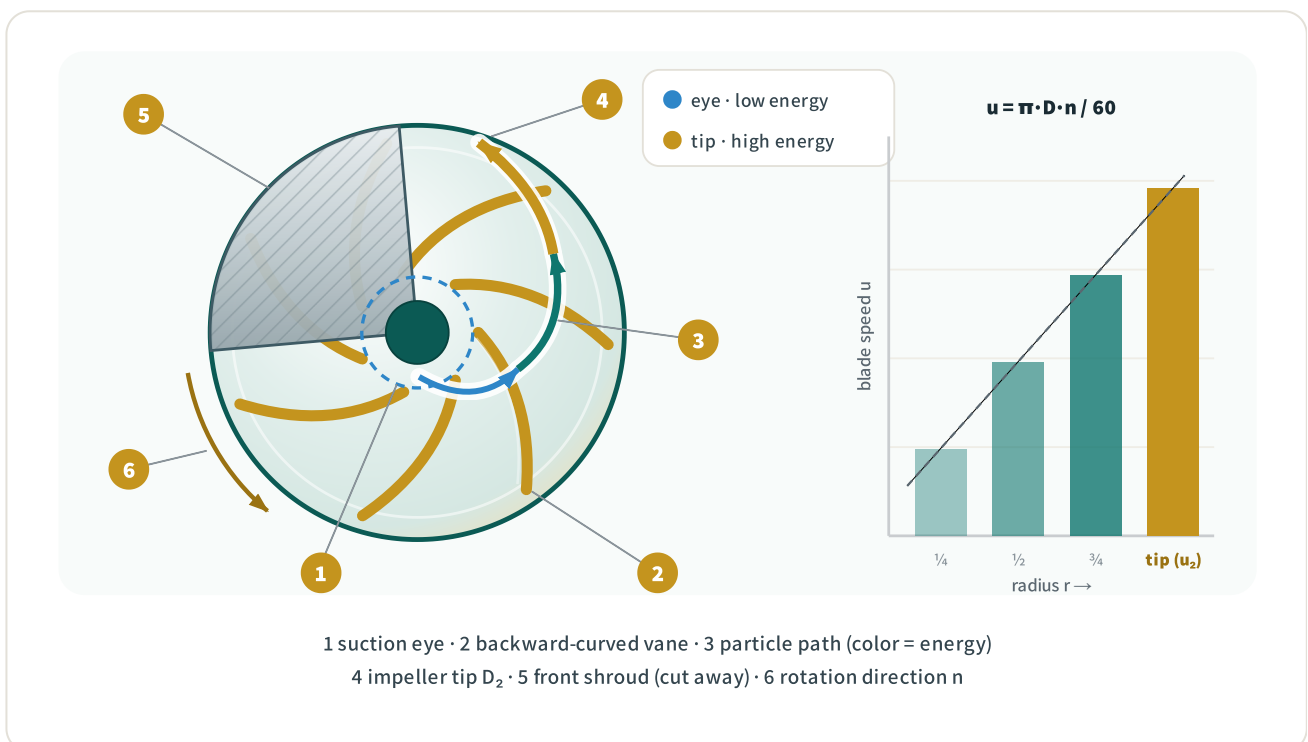


איור 3.1 • משולשי מהירות בכניסה (1) וביציאה (2). הווקטור המוחלט c (זהב) הוא הסכום הווקטורי של מהירות הלהב u (טורקיז) והמהירות היחסית w (אפור), שעוקבת אחר צורת הלהב בזווית β . ביציאה מפורק c_2 לרכיב ההיקפי c_{u2} , שקובע את העומד במשוואת אוילר, ולרכיב המרידיאלי c_{m2} שנושא את הספיקה. בכניסה ללא סחרור מקדים c_1 רדיאלי (זווית ישרה ל- u_1), ולכן $c_{u1} = 0$.

מסלול הזרימה במאיץ: איפה נוספת האנרגיה

כדי להרגיש את משוואת אוילר ברמת האינטואיציה, כדאי לעקוב אחר חלקיק מים יחיד בדרכו דרך המאיץ. הוא נכנס דרך **עין היניקה** (*suction eye*) במרכז, במקביל לציר הסיבוב. שם המהירות נמוכה ודיאלית בלבד. הלהבים תופסים אותו, מסיטים אותו החוצה ומגלגלים אותו בכיוון הסיבוב, וככל שהוא מתקדם דיאלית כלפי חוץ הוא מואץ. בקצה המאיץ הוא עוזב במהירות מוחלטת גבוהה, שרובה כבר בכיוון הסיבוב.

הנקודה הקריטית: **האנרגיה נמעט כולה נוספת לאורך הרדיוס, לא בקצה**. ככל שהחלקיק מתרחק ממרכז הסיבוב, מהירות הלהב סביבו $u = \pi \cdot D \cdot n / 60$ גדלה בליניאריות עם הקוטר, ומכאן שהקצה, בעל הקוטר הגדול ביותר, הוא הנקודה שבה הנוזל הכי "טעון". זה למה u_2 שולט במשוואת אוילר, וזה למה חיתוך קוטר המאיץ (פרק 13) מוריד עומד.



איור 3.2: מסלול חלקיק מים דרך המאיץ, מבט חזיתי עם רבע גזור: הכיסוי הקדמי (front shroud, החתך המקווקו) הוסר ברובו כדי לחשוף את הלהבים. מסלול החלקיק צבוע לפי האנרגיה: כחול בעין (מהירות ולחץ נמוכים), זהב בקצה. הגרף מימין מראה שמהירות הלהב u גדלה בליניאריות עם הרדיוס (הקו המקווקו), ולכן הקצה u_2 נושא את עיקר העברת האנרגיה.

סכמטי · מבט חזיתי, לא בקנה מידה

נחשב את העומד שמאיץ אחד יכול לייצר, צעד אחר צעד, ממהירות הסיבוב ועד העומד הריאלי. נתון מאיץ סגור טיפוסי של משאבת מים, קוטר חיצוני $D_2 = 250 \text{ mm}$, מסתובב במהירות מנוע דו-קוטבי $n = 2900 \text{ rpm}$. מעקום הלהב (זווית להב לאחור) הרכיב ההיקפי בקצה הוא בקירוב $c_{u2} \approx 0.55 \cdot u_2$, ומקדם ההחלקה של המאיץ הוא $\sigma = 0.85$.

$$g = 9.81 \text{ m/s}^2 \quad \sigma = 0.85 \quad c_{u2} = 0.55 \cdot u_2 \quad n = 2900 \text{ rpm} \quad D_2 = 0.250 \text{ m}$$

1 מהירות הקצה ההיקפית מהקוטר ומהסל"ד:

$$u_2 = \pi \cdot D_2 \cdot n / 60 = \pi \cdot 0.250 \cdot 2900 / 60 = 37.96 \text{ m/s}$$

2 הרכיב ההיקפי של המהירות המוחלטת בקצה:

$$c_{u2} = 0.55 \times 37.96 = 20.88 \text{ m/s}$$

3 העומד התאורטי מאוילר (ללא סחרור בכניסה, נוסחה 3.1):

$$H_{th} = u_2 \cdot c_{u2} / g = 37.96 \times 20.88 / 9.81 = 80.8 \text{ m}$$

4 מחילים את מקדם ההחלקה (נוסחה 3.2):

$$H_{th,real} = \sigma \cdot H_{th} = 0.85 \times 80.8 = 68.7 \text{ m}$$

תוצאה: מאיץ אחד מספק עומד תאורטי-ריאלי של כ-**69 m**. שים לב: עוד לא הורדנו את האיבודים ההידראוליים (פרק 4). העומד שיראה מד הלחץ בשטח יהיה נמוך מ-69 מטר בעוד כמה אחוזים, אחרי שחיכוך, פנייה והלם זרימה גוברים את שלהם.

בדיקת שפיות מהירה. כלל אצבע מקובל אומר שמקדם העומד של מאיץ רדיאלי טיפוסי הוא $\psi \approx 1.0$, כלומר $\psi = u_2^2 / (2g) \approx H$. כאן: $37.96^2 / (2 \cdot 9.81) = 73.4 \text{ m}$. התוצאה שלנו, 69 מטר, באותו מגרש בדיוק. כשמספר יוצא רחוק מ- $u_2^2/(2g)$ פי שניים או יותר, חפש טעות בקוטר או בסל"ד.

זווית הלהב: למה צורת העקום נקבעת כבר במאיץ

משוואת אוילר נותנת עומד, אבל מה קורה כשהספיקה משתנה? כאן נכנסת **זווית הלהב ביציאה** (*outlet blade angle, β_2*). הזווית הזו קובעת לאן "מצביע" הלהב בקצה, וביחד עם הספיקה היא קובעת את c_{u2} , ולכן את שיפוע עקום ה-H-Q. שלושה משפחות:

להב נטוי לאחור (backward-curved, $\beta_2 < 90^\circ$)

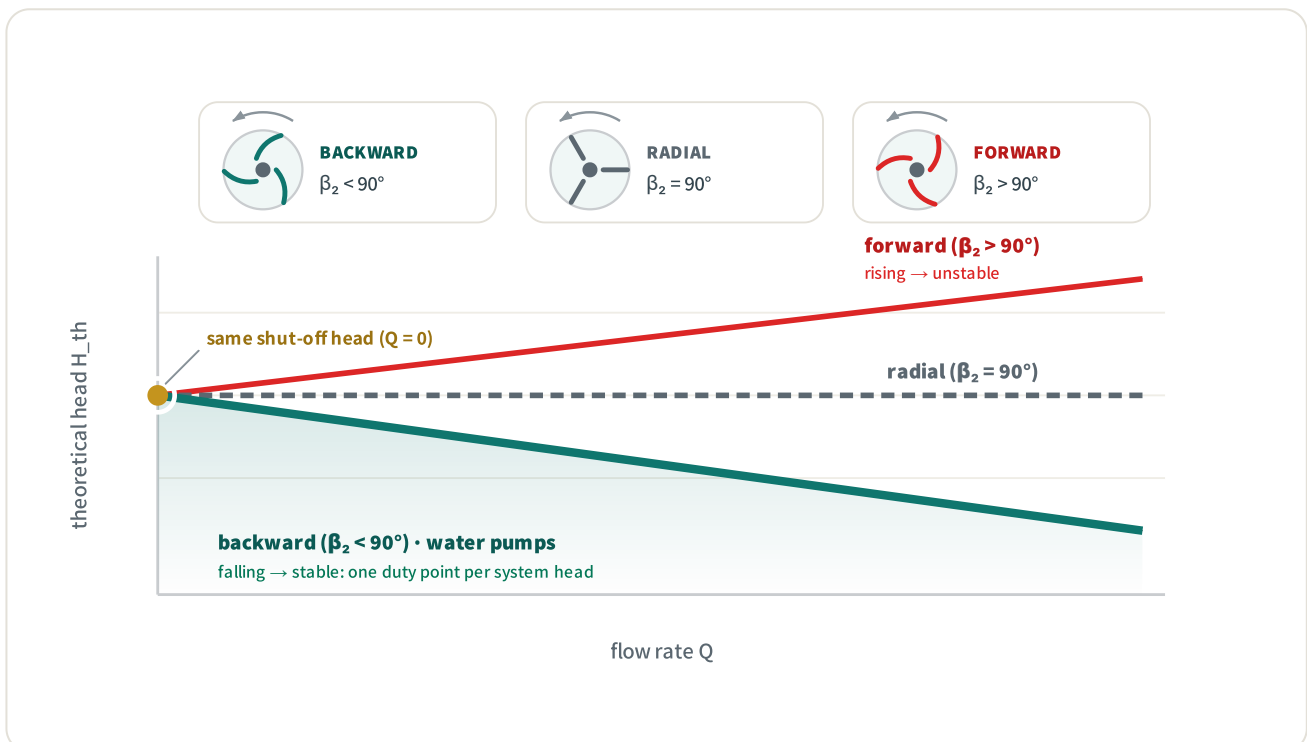
הלהב נוטה אחורה ביחס לכיוון הסיבוב. ככל שמזרימים יותר נוזל, הרכיב ההיקפי c_{u2} יורד, ולכן העומד יורד. התוצאה היא **עקום H-Q יורד ויציב**, עם נצילות גבוהה. זו הבחירה כמעט לכל

להב רדיאלי ($\text{radial}, \beta_2 = 90^\circ$)

הלהב מצביע ישר החוצה. c_{u2} אינו תלוי בספיקה, ולכן העומד התאורטי כמעט שטוח. נפוץ במשאבות בוצה ובמדחסים, שם חוזק מכני וקלות ייצור חשובים יותר מנצילות.

להב נטוי קדימה ($\text{forward-curved}, \beta_2 > 90^\circ$)

הלהב נוטה קדימה. כעת העומד התאורטי **עולה** עם הספיקה, מה שיוצר עקום לא יציב ונטייה לעומס יתר על המנוע. כמעט אף פעם לא בשאיבת מים, אבל נפוץ במפוחים ובמאווררים שבהם רוצים ספיקת אוויר גבוהה בנפח קטן.



איור 3.3 · שלוש משפחות הלהבים (בצלמיות למעלה, עם כיוון הסיבוב) והשפעתן על שיפוע עקום העומד התאורטי. להב נטוי לאחור (טורקיז) נותן עקום יורד ויציב, הבחירה למשאבות מים. להב רדיאלי (אפור) נותן עקום שטוח, ולהב נטוי קדימה (אדום) עקום עולה ולא יציב. שלושתם יוצאים מאותו עומד סגירה ב- $Q = 0$ (הנקודה הזהובה).

סכמטי · עקומים תאורטיים לפי אוילר, לפני איבודים

למה זה חשוב בשטח

כשמסתכלים על דף נתונים של משאבת מים, עקום ה- $H-Q$ כמעט תמיד **יורד משמאל לימין**, ועכשיו ברור למה: היצרן בחר להב נטוי לאחור. עקום יורד הוא גם עקום בטוח, כי לכל עומד מערכת יש נקודת עבודה אחת ויחידה (פרק 12). אם נתקלת אי-פעם בעקום שעולה לפני שהוא יורד ("גבנון"), זו נורת אזהרה ליציבות, וצריך לוודא שנקודת העבודה רחוקה מהאזור הזה.

החלקה: למה העומד האמיתי נמוך מהתאורטי

משוואת אוילר מניחה שהנוזל יוצא בדיוק בכיוון הלהב. במציאות הנוזל "מחליק" מעט אחורה ביחס לסיבוב, כי מספר הלהבים סופי והזרימה אינה מושלמת. התוצאה היא ש- c_{u2} האמיתי קטן מהאידיאלי, והעומד יורד. זו החלקה (slip).

נוסחה 3.2 • החלקה

$$H_{th,real} = \sigma \cdot H_{th} \quad \sigma < 1$$

מקדם החלקה (slip factor). תלוי במספר הלהבים ובזווית הלהב. טיפוסי 0.75–0.90.
יותר להבים $\Leftarrow$ פחות החלקה $\Leftarrow$ σ קרוב ל-1. זו אחת הסיבות למאיצים רב-להביים.

שים לב להבדל בין שלושה גדלים. **העומד התאורטי** מאילר, **העומד התאורטי בניכוי החלקה**, ו**העומד האמיתי** שיוצא מהמשאבה לאחר שמורידים גם את כל האיבודים ההידראוליים. כל הירידות האלה הן בדיוק הנושא של פרק 4.

למה להבים סופיים גורמים להחלקה

אוילר הניח מאיץ עם **אינסוף להבים דקים**, שמאלצים את הנוזל לעקוב בדיוק אחר צורת הלהב. במאיץ אמיתי יש שישה עד שמונה להבים בלבד, והנוזל שבין שני להבים סמוכים אינו מודרך לחלוטין. בתוך כל תעלת זרימה נוצרת מערבולת משנית הקרויה **סחרור יחסי (relative eddy)**: הנוזל מסתובב מעט בכיוון ההפוך לסיבוב המאיץ. התוצאה היא שהנוזל עוזב את הקצה בזווית רדודה מזווית הלהב, הרכיב ההיקפי c_{u2} קטן מהאידיאלי, והעומד יורד. זו ההחלקה. היא אינה איבוד אנרגיה אלא **פער בין מה שהלהב מבטיח לבין מה שהזרימה מספקת**, ולכן אפילו במאיץ מושלם ללא חיכוך תהיה החלקה.

שני שמות חוזרים בכל ספר על תכן מאיצים, ושניהם נוסחאות לאמוד את מקדם ההחלקה σ מתוך מספר הלהבים והזווית. **סטודולה (Stodola)** נתן את האומדן הקלאסי הפשוט, ו**וויזנר (Wiesner)** כייל מאוחר יותר נוסחה אמפירית מדויקת יותר שנמצאת בשימוש רחב עד היום. למהנדס בשטח אין צורך לחשב אותן ביד, אבל כדאי לזכור את המגמה: יותר להבים מקרבים את σ ל-1, וזווית להב קטנה יותר (להב נטוי יותר לאחור) אף היא מקטינה את ההחלקה.

טבלה 3.1 • מקדם החלקה טיפוסי מול מספר להבים (כלי עזר)

מספר להבים Z	(טיפוסי) Σ מקדם החלקה	הערה
3–4	0.70–0.78	מעבר חופשי גדול, החלקה ניכרת
5–6	0.78–0.84	מאיצי ביוב וניקוז
7–8	0.84–0.90	מאיצי מים נקיים, הנפוץ ביותר
≥ 9	0.90–0.94	מאיצים רב-להביים, עומד גבוה

החלקה אינה איבוד נצילות

בלבול נפוץ. ההחלקה מורידה את העומד, אבל היא **אינה** נספרת כאיבוד נצילות בפרק 4. הסיבה: גם ההספק שהמאיץ מעביר לנוזל יורד באותו יחס, כך שהנצילות ההידראולית אינה נפגעת מההחלקה עצמה. ההחלקה פשוט מגדירה את "תקרת" העומד הריאלי של המאיץ. האיבודים האמיתיים, חיכוך דיסק, נזילה פנימית וחיכוך זרימה, הם שמורידים נצילות, והם הנושא של הפרק הבא.

מאويلר אל חוקי הדמיות: $H \propto n^2$ מאיפה

משוואת אוילר אינה רק תיאורית יפה, היא השורש המתמטי של **חוקי הדמיות** (affinity laws) שמלווים אותנו לאורך כל הספר ומגיעים לשיאם בפרק 13 ובכל חישוב מהירות משתנה (VFD). נראה בקצרה איך הם נושרים ישירות מאוילר.

נניח שאותו מאיץ בדיוק מסתובב בשתי מהירויות שונות, n_1 ו- n_2 . הגיאומטריה זהה, ולכן משולשי המהירות נשמרים **דומים**, רק גדלים. מכאן:

- מהירות הקצה פרופורציונית ל- ω : $u_2 = \pi \cdot D \cdot n / 60 \propto n$. וגם המהירות ההיקפית $c_{u2} \propto n$.
- הספיקה פרופורציונית למהירות המרידיאנית, שגם היא $\propto n$, ולכן $Q \propto n$.
- העומד מאוילר הוא מכפלה של שתי מהירויות, $H \propto u_2 \cdot c_{u2} \propto n \cdot n = n^2$.
- ההספק הוא מכפלה של ספיקה בעומד, $P \propto Q \cdot H \propto n \cdot n^2 = n^3$.

נוסחה 3.3 • חוקי הדמיות (תצוגה מקדימה לפרק 13)

$$Q \propto n \quad \cdot \quad H \propto n^2 \quad \cdot \quad P \propto n^3$$

→ שלושת היחסים נושרים ישירות ממשוואת אוילר ומדמיון משולשי המהירות. אין בהם פיזיקה חדשה, רק קנה מידה.

$P \propto n^3$ היחס הקריטי לחיסכון אנרגיה: הפחתת מהירות ב-20% חותכת הספק ל- $0.51 \approx 0.8^3$, כמעט חצי. זה למה ל-VFD יש ROI כה גבוה (פרקים 13 ו-19).

הקשר בספר

החיבור הזה בין אוילר לחוקי הדמיות הוא אחד הרעיונות הנושאים של הספר. את משולשי המהירות והעומד פגשנו כאן בפרק 3, את שרשרת האיבודים שמורידה את העומד התאורטי לעומד האמיתי נראה בפרק 4, את עקומות המאפיין המלאות בפרק 12, ואת חוקי הדמיות על בוריים, כולל חיתוך קוטר מאיץ ומהירות משתנה, בפרק 13. כל אלה הם בעצם בנים של משוואה אחת.

אז מה? העומד נולד במהירות הקצה. המאיץ מאיץ את הנוזל, אוילר מתרגם את ההאצה לעומד, החלקה גורעת חלק, ואיבודים גורעים עוד. כשתסתכל בפרק הבא על שרשרת הנצילות, תזהה בדיוק איפה כל אחוז הולך לאיבוד, ולמה.

4 איבודים ונצילות

Losses & Efficiency

בקצרה

לא כל ההספק שהמנוע מספק הופך למים מורמים. חלקו אובד בדרך בארבעה סוגי איבודים: **הידראוליים, נפחיים, מכניים וחיכוך דיסק**. מה שנשאר הוא **נצילות המשאבה**. כשמוסיפים את נצילות המנוע וה-VFD מקבלים את **הנצילות הכוללת**, מהחשמל ועד המים. כלל מפתח ישראלי: הסף הרגולטורי נמדד בנצילות הכוללת, לא בנצילות המשאבה בלבד.

ארבעת האיבודים

משאבה היא לא מכונה מושלמת. בכל שלב בדרך, חלק מהאנרגיה הופך לחום, לרעש או לזרימה חוזרת. ארבעה איבודים מסבירים את הכול.

1 איבודים הידראוליים (hydraulic)

חיכוך הנוזל בלהבים ובמשאון, מערבולות וזרימה חוזרת. בדרך כלל האיבוד הגדול ביותר, וגדל הרבה מחוץ ל-BEP.

2 איבודים נפחיים (volumetric)

נזילה פנימית דרך טבעות השחיקה מהצד הלחוץ חזרה לצד היניקה. מאיץ שחוק = יותר נזילה = פחות ספיקה.

3 איבודים מכניים (mechanical)

חיכוך במסבים ובאטם הציר. קטנים יחסית, אך גדלים עם בלאי וסיכה לקויה.

4 חיכוך דיסק (disk friction)

התנגדות הנוזל לסיבוב גב המאיץ. משמעותי במאיצים גדולים ובמהירות סגולית נמוכה.

נצילות (efficiency) ·

היחס בין ההספק שיצא מועיל לבין ההספק שנכנס. תמיד קטן מ-1. כל איבוד מוריד אותו במעט.

הספק הידראולי (hydraulic power) ·

ההספק המועיל שהמשאבה מעבירה לנוזל בפועל, $P_h = Q \cdot H / 367$ ב-kW. המונה של שרשרת הנצילות.

הספק ציר (shaft power) ·

ההספק שהציר מוסר למאיץ. גדול מ- P_h בדיוק בארבעת האיבודים שבמשאבה.

הספק חשמלי (electrical input) ·

ההספק שנכנס מהרשת לפני המנוע, $P_1 = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \cos \varphi / 1000$. המכנה של הנצילות הכוללת.

היכן כל איבוד שולט

ארבעת האיבודים אינם שווים, וגם לא קבועים. כל אחד מהם דומיננטי בתנאי הפעלה אחרים, ולכן אבחון נכון מתחיל בזיהוי איזה איבוד גדל ולמה.

איבודים הידראוליים (hydraulic losses)

זהו לרוב האיבוד הגדול ביותר, ובמשאבת מים טיפוסית הוא אחראי לכמחצית מכלל ההפסד. הוא נובע מחיכוך הנוזל בדפנות תעלות הלהבים, מהתנגשות הזרימה בלשון הגוף וממערבולות. הנקודה הקריטית: ההפסד ההידראולי מינימלי בדיוק ב-BEP, שבו זווית הכניסה של הנוזל תואמת את זווית הלהב. ככל שמתרחקים מ-BEP לשני הכיוונים, הנוזל פוגע בלהב בזווית שגויה (הלם כניסה *incidence shock*), נוצרות מערבולות, וההפסד מטפס בחדות. לכן משאבה שעובדת רחוק מנקודת התכן שלה מאבדת נצילות בעיקר דרך איבודים הידראוליים, וזו הסיבה ההנדסית מאחורי טווח ההפעלה המועדף (POR) שנפגוש בפרק 12.

איבודים נפחיים (volumetric losses)

הנוזל הלחוץ שכבר עבר את המאיץ דולף בחזרה לעין היניקה דרך מרווחי טבעות השחיקה. זו אנרגיה שהושקעה במלואה ואז "התבזזה" כי הנוזל חזר אחורה. במשאבה חדשה האיבוד הנפחי קטן, עד 1-3 נקודות אחוז, אבל הוא גדל בשקט עם הבלאי: ככל שטבעות השחיקה נפתחות, הנזילה מטפסת. זה האיבוד היחיד מהארבעה שהאחזקה יכולה ממש להחזיר אחורה, על ידי החלפת טבעות שחיקה זולות (פרק 5). הוא בולט במיוחד במשאבות עומד גבוה, שם הפרש הלחץ על המאיץ גדול ודוחף יותר נזילה.

איבודים מכניים (mechanical losses)

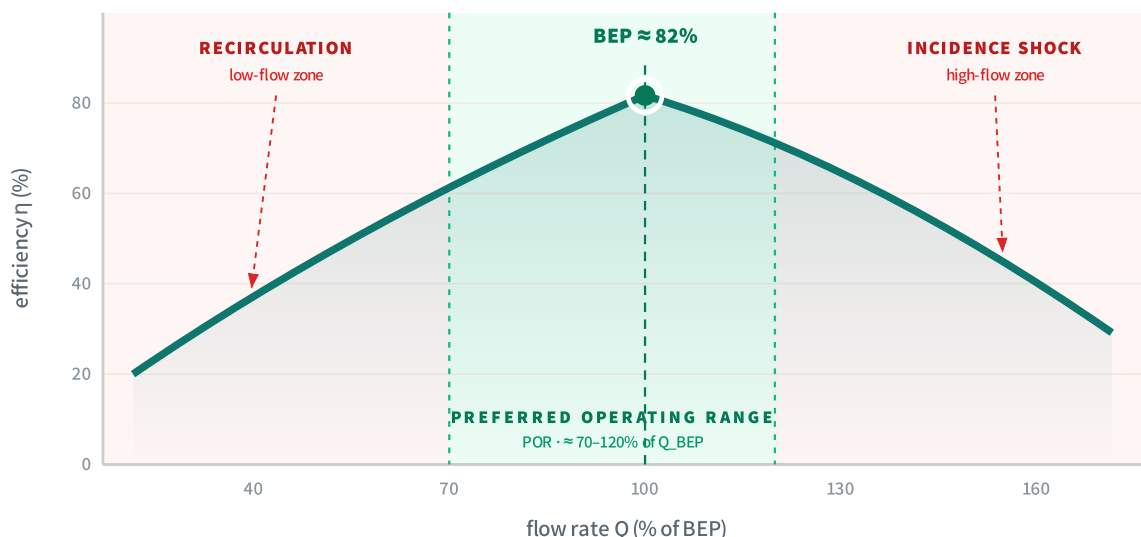
חיכוך טהור במסבים ובאטם הציר. זהו בדרך כלל האיבוד הקטן ביותר, פחות מ-2% במשאבה תקינה, והוא כמעט קבוע, לא תלוי בספיקה. החשיבות שלו אבחונית: אם האיבוד המכני קופץ, זה סימן לבעיה פיזית, מסב שמתחיל להיכשל, אטם מכני מהודק יתר על המידה או סיכה לקויה, ולא לבעיה הידראולית. עלייה במכני באה כמעט תמיד עם חום וברעידות (פרק 23).

חיכוך דיסק (disk friction)

גב המאיץ ודופנותיו סובבים בתוך נוזל, והנוזל מתנגד לסיבוב כמו בלם צמיג. הספק חיכוך הדיסק גדל בקירוב עם $D^5 \cdot n^3$, כלומר חזק מאוד עם הקוטר ועם המהירות. לכן הוא הופך לדומיננטי דווקא במהירות סגולית נמוכה ($n_q < 20$): מאיצים קטנים-ספיקה וגדולי-קוטר לעומד גבוה. זו הסיבה הפיזיקלית שבוסטר זעיר בעומד גבוה לעולם לא יגיע לנצילות של משאבת מים בינונית, גם אם הוא חדש ומושלם. כשמשאבה קטנה "מתעקשת" לא לעבור 60%, חיכוך דיסק הוא לרוב האשם, וזה גבול פיזיקלי, לא תקלה (פרק 5).

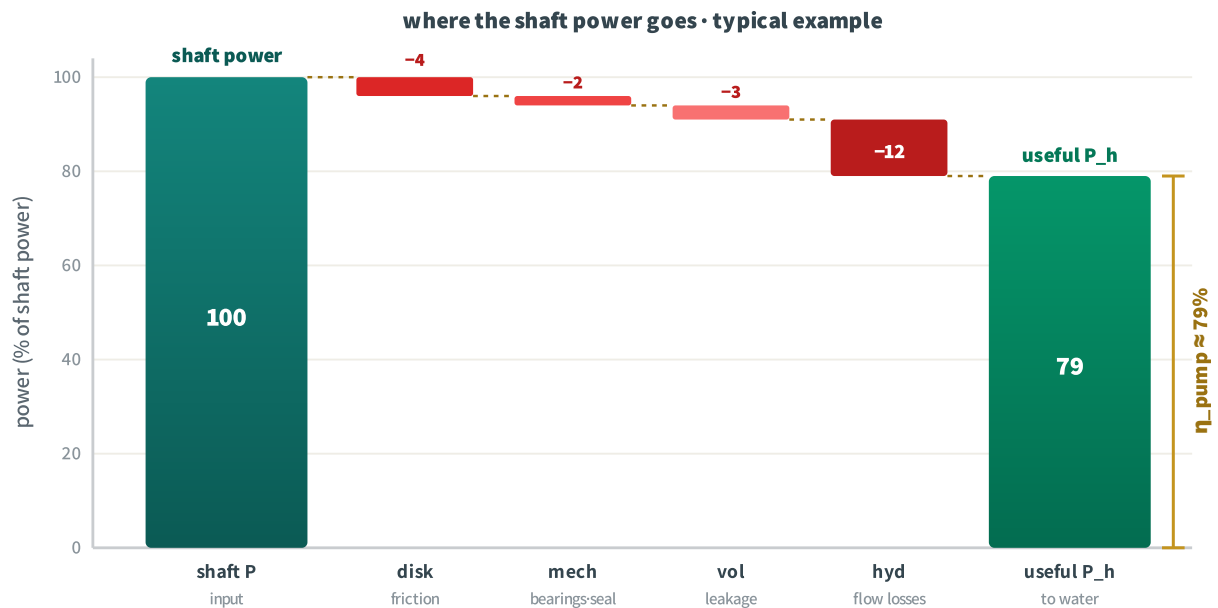
מי דומיננטי, ומתי

- **רחוק מ-BEP** – הידראולי שולט. הזרימה פוגעת בלהבים בזווית שגויה.
- **משאבה ותיקה** – נפחי גדל. טבעות שחיקה שנשחקו ופתחו את המרווח.
- **מהירות סגולית נמוכה** – חיכוך דיסק שולט. גבול פיזיקלי של מאיצים צרים בעומד גבוה.
- **חום, רעש, רעידות** – חשד מכני. מסב או אטם, לא הידראוליקה.



איור 4.1 · עקום הנצילות מול הספיקה הוא "גבעה". השיא הוא נקודת הנצילות המיטבית (BEP, הנקודה עם ההילה הלבנה), ומשני צדדיו הנצילות צונחת: בספיקה נמוכה בגלל זרימה חוזרת (recirculation), ובספיקה גבוהה בגלל הלם כניסה. הרצועה הירוקה היא טווח ההפעלה המועדף (POR), שבו הנצילות קרובה לשיא והמשאבה רגועה; האזורים האדומים משני הצדדים הם אזורי הסיכון.

סכמטי · ערכים להמחשה · ראה פרק 12 לעקומות המלאות



איור 4.2 · מפל ההספק: לאן הולך כל אחוז. מהספק הציר (shaft power, טורקיז) יורדים ארבעת האיבודים (אדום): חיכוך דיסק, מכני, נפחי והידראולי. המדרגות הזהובות המקווקוות מחברות כל שלב לשלב הבא. מה שנשאר (ירוק) הוא ההספק ההידראולי המועיל: נצילות המשאבה $\eta_{pump} \approx 79\%$. הערכים להמחשה; היחס משתנה לפי גודל ומהירות סגולית.

ערכים טיפוסיים להמחשה · נצילות משאבה $\approx 79\%$

שרשרת הנצילות: מהחשמל ועד המים

הנצילות אינה מספר אחד אלא שרשרת. כל חוליה מכפילה את הקודמת. אפשר לחלק אותה לשתי קבוצות: נצילות המשאבה עצמה, ונצילות מערכת ההנעה.

נוסחה 4.1 · שרשרת הנצילות

$$\eta_{pump} = \eta_h \cdot \eta_v \cdot \eta_m \quad | \quad \eta_{total} = \eta_{pump} \cdot \eta_{motor} \cdot \eta_{VFD}$$

η_h נצילות הידראולית · η_v נפחית · η_m מכנית. במוסכמה זו חיכוך הדיסק נכלל בתוך η_m יחד עם האיבוד המכני.

η_{motor} נצילות המנוע (IE2–IE5, פרק 18). η_{VFD} נצילות הממיר אם קיים.

η_{total} **wire-to-water**: היחס בין ההספק ההידראולי המועיל לבין החשמל הנכנס.

כלל רגולטורי קריטי

הסף הרגולטורי של משרד האנרגיה נמדד ב**נצילות הכוללת** (η_{total} , מהחשמל למים), ולא בנצילות המשאבה בלבד. כך נצילות מנוע נמוכה או הפסדי VFD נספרים נגד המתקן. אל תדווח נצילות משאבה במקום נצילות כוללת, זו טעות שמטעה גם את הלקוח וגם את הרגולטור.

דוגמה 4.1 • נצילות כוללת מנקודת מדידה אחת (wire-to-water)

בדיקת שדה של משאבת בור. נמדדו מתח, זרם ומקדם הספק בלוח, וכן ספיקה ועומד. נחשב את הנצילות הכוללת.

$$H = 68.5 \text{ m} \quad Q = 45.2 \text{ m}^3/\text{h} \quad \cos \varphi = 0.85 \quad I = 28.3 \text{ A} \quad U = 400 \text{ V}$$

1 הספק חשמלי נכנס (תלת-פאזי):

$$P_1 = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \cos \varphi / 1000 = \sqrt{3} \cdot 400 \cdot 28.3 \cdot 0.85 / 1000 = 16.67 \text{ kW}$$

2 הספק הידראולי מועיל:

$$P_h = Q \cdot H / 367 = 45.2 \cdot 68.5 / 367 = 8.44 \text{ kW}$$

3 נצילות כוללת:

$$\eta_{\text{total}} = P_h / P_1 \cdot 100 = 8.44 / 16.67 \cdot 100 = 50.6\%$$

תוצאה: **$\eta_{\text{total}} = 50.6\%$** . מתחת לסף של 55% למשאבת בור. המשאבה אינה עומדת בדרישות ויש לבדוק שיפוף או החלפה. כל אחוז נצילות שווה כאן כסף, חודש אחר חודש.

שים לב לקבוע 367. הוא נובע מ- $(\rho \cdot g) / (3600 \cdot 1000)$, עם $\rho \approx 1000 \text{ kg/m}^3$, והופך m^3/h ומטרים ל-kW. נחזור אליו ועל בדיקות נצילות מלאות בפרק 2.4.

טבלה 4.1 • טווחי נצילות כוללת טיפוסיים (התמצאות)

סוג מתקן	נצילות טובה	גבולי	סף רגולטורי
בוסטר / משטחית	72–80%	65–72%	65%
טורבינה / בור	68–76%	55–68%	55%
ביוב	55–65%	50–55%	50%

כמה עולה אחוז נצילות

עד כאן דיברנו באחוזים. אבל מנהל מתקן לא משלם באחוזים, הוא משלם בשקלים על חשבון החשמל בכל חודש. הקסם של נצילות הוא שהיא מתורגמת ישירות לכסף: כל נקודת אחוז שאובדת היא הספק נוסף שהמנוע מושך מהרשת כדי לספק אותה כמות מים. ההספק המועיל קבוע, ולכן ככל שהנצילות נמוכה יותר, ההספק הנכנס גדל ביחס הפוך.

$$\Delta P_1 = P_h \cdot (1/\eta_2 - 1/\eta_1) \quad | \quad \text{₪/yr} = \Delta P_1 \cdot h \cdot \text{rate}$$

ΔP_1 תוספת ההספק החשמלי הנכנס בעקבות הירידה [kW].
 P_h ההספק ההידראולי המועיל, קבוע (אותה ספיקה ועומד) [kW].
 η_1, η_2 הנצילות לפני הירידה ואחריה. $\eta_2 < \eta_1$.
 h, rate שעות הפעלה בשנה, ותעריף החשמל [₪/kWh]. כאן 0.40 ₪ למתח גבוה (פרק 26).

דוגמה 4.2 · מה עולה צניחה של חמש נקודות נצילות

משאבת בור עובדת בנקודת עבודה שדורשת הספק חשמלי של 55 kW בנצילות כוללת של 70%. אחרי כמה שנים, בלאי טבעות שחיקה ושחיקת מאיץ הורידו את הנצילות ל-65%. המשאבה רצה 5,000 שעות בשנה. כמה כסף עולה הבלאי הזה, בחשמל בלבד?

$$\text{rate} = 0.40 \text{ ₪/kWh} \quad h = 5,000 \text{ h/yr} \quad \eta_2 = 65\% \quad P_1 (\text{old}) = 55 \text{ kW} @ \eta_1 = 70\%$$

1 ההספק ההידראולי המועיל לא משתנה, נחשב אותו מהמצב הישן:

$$P_h = P_1 \cdot \eta_1 = 55 \times 0.70 = 38.5 \text{ kW}$$

2 ההספק הנכנס במצב החדש, לאותו P_h :

$$P_1 (\text{new}) = P_h / \eta_2 = 38.5 / 0.65 = 59.23 \text{ kW}$$

3 תוספת ההספק שנמשכת מהרשת לחינם:

$$\Delta P_1 = 59.23 - 55 = 4.23 \text{ kW}$$

4 אנרגיה נוספת בשנה: $4.23 \times 5,000 \approx 21,150 \text{ kWh/yr}$

5 עלות שנתית: $21,150 \times 0.40 \approx \text{₪}8,460 \text{ /yr}$

תוצאה: **לשנה 8,460 ₪**, רק מחמש נקודות נצילות. על פני 10 שנות חיים זה מעל 84,000 ₪, יותר ממחיר משאבה חדשה. וזו דוגמה שמרנית: מתקן שרץ 8,760 שעות בשנה משלם כמעט פי שניים.

זה הטיעון הכלכלי של כל הספר. נצילות אינה מותרות הנדסיות אלא שורה בתקציב. החלפת זוג טבעות שחיקה ב-3,000 ₪ שמחזירה חמש נקודות מחזירה את עצמה תוך פחות מחצי שנה. את הניתוח הכלכלי המלא, כולל ערך נוכחי ותקופת החזר, נפרוס בפרק 26.

SEC: צריכה סגולית כמדד השדה

נצילות באחוזים מצוינת להשוואה הנדסית, אבל בשטח יש מדד פשוט עוד יותר שמנהלי מתקנים חיים לפיו: **צריכה אנרגטית סגולית** (*Specific Energy Consumption, SEC*). זו פשוט כמות החשמל הדרושה כדי להרים מטר מעוקב מים אחד.

נוסחה 4.3 • צריכה סגולית

$$SEC = P_1 / Q \quad [kWh/m^3]$$

P_1	ההספק החשמלי הנכנס [kW]
Q	הספיקה [m^3/h]. היחידות מצטמצמות ל- kWh/m^3 .
SEC	נמוך יותר = טוב יותר. תלוי בעומד: ככל שמרימים גבוה יותר, SEC גדל באופן בלתי נמנע.

היופי ב-SEC הוא שהוא מאחד הכול במספר אחד שאפשר להכפיל בתעריף: $\text{rate} = SEC \times \text{מ}/\text{מ}^3$. אם תחנה מעבירה $500,000 m^3$ בשנה ב-SEC של 0.45 במקום 0.35, ההפרש הוא 50,000 kWh וכ-20,000 ש"ח בשנה. אבל יש מלכודת: **SEC תלוי בעומד**. אי אפשר להשוות SEC של בוסטר נמוך מול משאבת בור עמוקה. ההשוואה ההוגנת היא תמיד מול ה-SEC הצפוילאות עומד, וזה בדיוק מה שטבלת ההתמצאות הבאה נותנת.

טבלה 4.2 • ערכי SEC טיפוסיים לשאיבת מים לפי עומד (כלי עזר)

עומד H	טוב SEC	גבולי SEC	m^3/M^3 (0.40 @)
בוסטר 20–40 m	0.07–0.15	> 0.17	0.03–0.06
בינוני 40–80 m	0.14–0.30	> 0.34	0.06–0.12
בור 80–150 m	0.29–0.60	> 0.74	0.12–0.24
בור עמוק > 150 m	0.54–0.80	> 0.99	0.22–0.32

SEC ונצילות, שני צדדים של אותו מטבע

אפשר לעבור מ-SEC לנצילות ובחזרה. מאחר ש- $P_1 = P_h / \eta = (Q \cdot H / 367) / \eta$, מתקבל ש- $SEC = H / (367 \cdot \eta)$. כלומר SEC הוא בעצם נצילות מנורמלת לעומד. נמדד עומד 80 m ב-SEC של 0.35? הנצילות הכוללת היא $62\% \approx (367 \times 0.35) / 80$, כלומר מתחת לסף של 65% למתקן משטחי (טבלה 4.1). מנהל שמדבר ב-SEC ומהנדס שמדבר בנצילות מדברים על אותו דבר בדיוק.

נצילות משאבה מול נצילות כוללת: הפיצול

החזרנו לכלל הרגולטורי, וזו הנקודה שבה הוא הופך מעשי. הסף נמדד בנצילות הכוללת, אבל היצרן מפרסם בעקום בדרך כלל את נצילות המשאבה בלבד. ההבדל בין השניים הוא מערכת ההנעה, המנוע והממיר, ושם נבלעות נקודות נצילות יקרות שצריך לספור אותן בנפרד.

עקום היצרן מבטיח נצילות משאבה של 78% בנקודת העבודה. המתקן מונע במנוע IE3 בנצילות 93%, ובהמשך נשקול להוסיף ממיר תדר (VFD) בנצילות 97%. מה הנצילות הכוללת שמולה נמדד הסף?

$$\eta_{\text{pump}} = 78\% \quad \eta_{\text{motor}} = 93\% \text{ (IE3)} \quad \eta_{\text{VFD}} = 97\%$$

1 בלי ממיר, חיבור ישיר לרשת (DOL):

$$\eta_{\text{total}} = \eta_{\text{pump}} \cdot \eta_{\text{motor}} = 0.78 \times 0.93 = 72.5\%$$

2 עם ממיר תדר בשרשרת: $\eta_{\text{total}} = 0.78 \times 0.93 \times 0.97 = 70.4\%$

3 הפער מנצילות המשאבה המפורסמת: נקודות אחוז $78\% - 70.4\% = 7.6$

תוצאה: נצילות משאבה 78% נראית מצוינת, אבל הנצילות הכוללת היא **72.5%** בלבד, ועם ממיר אף 70.4%. אם הסף הוא 72%, החיבור הישיר עובר בקושי והוספת ממיר עלולה להפיל את המתקן מתחת לסף, גם אם המשאבה עצמה מצוינת.

שתי מסקנות מעשיות. ראשית, אל תדווח לעולם נצילות משאבה במקום נצילות כוללת, זה מטעה את הלקוח ואת הרגולטור. שנית, הממיר אינו "חינם": הוא צורך כ-23 נקודות נצילות בעצמו, ולכן משתלם רק כשהחיסכון מהאטת הסיבוב (חוקי הדמיות, פרק 13) גדול מההפסד הזה. בעומד קבוע גבוה, לעיתים עדיף חיבור ישיר.

למה המנוע נמדד יחד עם המשאבה

מנקודת המבט של הלקוח, החשמל נכנס בלוח והמים יוצאים בצינור, ומה שקורה באמצע, מנוע, ממיר ומשאבה, הוא קופסה אחת. הרגולטור חושב כך בכוונה: מנוע IE1 ישן בנצילות 88% "גוזל" ארבע נקודות לעומת IE3, וזה נספר נגד המתקן בדיוק כמו מאיץ שחוק. לכן שדרוג מנוע (פרק 18) הוא לעיתים הדרך הזולה ביותר להעלות נצילות כוללת, בלי לגעת בהידראוליקה כלל.

קישורים בספר

למה הנצילות נופלת משני צדי ה-BEP, וטווח ההפעלה המועדף, בפרק 12. השפעת מהירות הסיבוב והקוטר על האיבודים, דרך חוקי הדמיות, בפרק 13. נצילות המנוע ודרגות IE2-IE5 בפרק 18. בלאי טבעות השחיקה והחזרת נצילות נפחית בפרק 5 ובפרק 9. בדיקת נצילות מלאה בשדה בפרק 24. הניתוח הכלכלי, ערך נוכחי ותקופת החזר, בפרק 26.

אז מה? נצילות היא שרשרת, וכל חוליה עולה כסף. ארבעה איבודים בתוך המשאבה, ועוד שתי חוליות בהנעה, מפרידים בין החשמל למים, וכל אחד מהם דומיננטי בתנאי הפעלה אחרים. בדיקת wire-to-water פשוטה מגלה את המספר האמיתי, וה-SEC מתרגם אותו ישר לשקלים למטר מעוקב. זכור שתי נקודות מפתח: הסף הרגולטורי נמדד בנצילות הכוללת, לא בנצילות המשאבה, וחמש נקודות נצילות אבודות שוות אלפי שקלים בשנה. כשהמספר מתחת לסף, יש החלטה כלכלית לקבל, וכל הכלים לכך בפרקים 24 עד 26.



חלק שלישי

מבנה ורכיבים

Construction & Components

מאיצים וגופי משאבה	5
צירים, מסבים, מצמדים ותושבות	6
אטימת ציר	7
דחף צירי ורדיאלי ואיזונו	8
חומרים, קורוזיה ושחיקה	9
טבעות שחיקה: מרווח, חומרים והיתקעות	10

5 מאיצים וגופי משאבה

Impellers & Casings

בקצרה

למשאבה צנטריפוגלית יש בלב שלה רק שני רכיבים הידראוליים. **המאיץ** הוא היחיד שמוסיף אנרגיה לנוזל. **הגוף** אוסף את הזרימה היוצאת ממנו וממיר מהירות ללחץ. כל שאר חלקי המשאבה קיימים כדי לשרת את שני אלה.

צורת המאיץ, מספר הלהבים שלו והאם הוא **סגור**, **חצי-פתוח** או **פתוח** קובעים את המתח הבסיסי של כל בחירה: **נצילות מול עמידות בסתימה**. סוג הגוף, **לשון** או **מפזר**, קובע איך מאזנים את העומס הרדיאלי ואיך מערימים דרגות. וטבעות השחיקה, הרכיב המתכלה הזול ביותר, קובעות כמה זמן הנצילות הזו תחזיק.

מבט-על: שני הרכיבים שעושים את העבודה

הסבר שלם של משאבה צנטריפוגלית מתחיל בהבחנה אחת. רכיב אחד *מוסיף* אנרגיה. רכיב שני *ממיר* אותה. כל היתר זה אטימה, מיסוב והחזקה.

המאיץ מסתובב, ובכך מאיץ את הנוזל כלפי חוץ ומעניק לו אנרגיה קינטית (מהירות) ואנרגיית לחץ. בקצה המאיץ הנוזל נע מהר אבל הלחץ עדיין נמוך יחסית. כאן נכנס הגוף: הוא חייב להאט את הנוזל בהדרגה, כי לפי משוואת ברנולי (פרק 2) האטה מסודרת הופכת מהירות ללחץ. אם ההאטה פתאומית, האנרגיה הולכת לאיבוד כמערבולת וחום במקום להפוך ללחץ מועיל. כל ההנדסה של גופי משאבה היא, בבסיסה, אמנות ההאטה האיטית.

מאיץ · *impeller*

הגלגל המסתובב עם הלהבים. הרכיב היחיד שמוסיף אנרגיה לנוזל. בעברית מקצועית: **מאיץ** (או "אימפלר").

גוף המשאבה · *casing*

המעטפת הנייחת שעוטפת את המאיץ, אוספת את הזרימה היוצאת וממירה מהירות ללחץ דרך מעבר מתרחב.

דופן · *shroud*

הצלחת שסוגרת על הלהבים. מאיץ סגור כולל שתי דפנות (קדמית ואחורית), חצי-פתוח רק אחורית, ופתוח אף אחת.

עין היניקה · *suction eye / inlet*

הפתח המרכזי שדרכו הנוזל נכנס למאיץ, במקביל לציר הסיבוב.

סוגי מאיצים: סגור, חצי-פתוח, פתוח

הבחירה בין שלושת סוגי המאיצים היא בעצם בחירה אחת: **כמה דפנות יש למאיץ**. הדופן סוגרת על תעלות הזרימה בין הלהבים, ולכן ככל שיש יותר דפנות, פחות נוזל בורח מבין הלהבים

והנצילות גבוהה יותר. אבל אותן דפנות יוצרות מרווחים צרים שמוצקים נתקעים בהם, ולכן מאיץ סגור הוא גם הרגיש ביותר לסתימה.

מאיץ סגור (closed / shrouded)

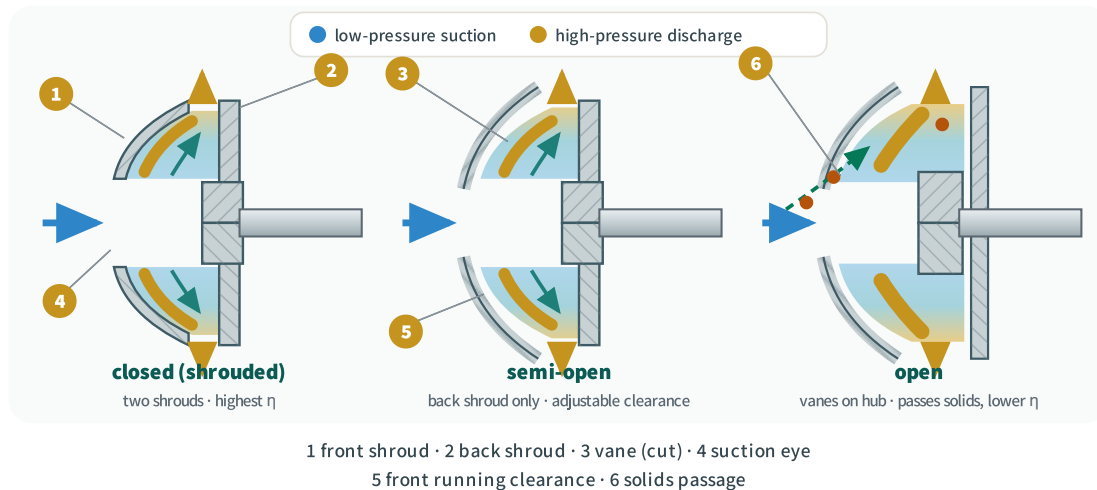
שתי דפנות, קדמית ואחורית, סוגרות על הלהבים ויוצרות תעלות זרימה אטומות. זו הבחירה הנפוצה ביותר למים נקיים, והיא נותנת את הנצילות הגבוהה ביותר, בדרך כלל 2 עד 4 נקודות אחוז מעל מאיץ פתוח באותו גודל. החיסרון: כל מוצק שנכנס לתעלה הסגורה יכול לתקוע אותה. לכן מאיץ סגור מתאים למים נקיים, לבוסטרים, למשאבות בור ולמשאבות רב-שלביות.

מאיץ חצי-פתוח (semi-open)

דופן אחורית בלבד. הלהבים חשופים מצד היניקה ורצים במרווח קטן מול לוח הגוף הנייח. הנצילות בינונית-גבוהה, והיתרון הגדול הוא שאפשר לכוון את המרווח החזיתי על ידי הזזת המאיץ או הגוף, מה שמחזיר נצילות אחרי בלאי. מתאים למים עם מוצקים קלים, לתמיסות ולשפכים דלילים.

מאיץ פתוח (open)

אין דפנות כלל, רק להבים על טבור מרכזי. הנצילות הנמוכה ביותר, אבל היכולת להעביר מוצקים גדולים היא הגבוהה ביותר. נפוץ בשאיבת בוצה, נוזלים עם סיבים ומוצקים, ויישומים שבהם אמינות חשובה יותר מכל אחוז נצילות.



איור 5.1 · שלושת סוגי המאיצים בחתך אורך דרך ציר הסיבוב. במאיץ הסגור שתי דפנות מקווקוות (חתך מתכת) סוגרות על תעלת הזרימה; בחצי-פתוח נשארת רק הדופן האחורית, והלהב רץ מול דופן הגוף במרווח מתכוון; בפתוח הלהבים יושבים על הטבור בלבד, ומוצקים (חום) עוברים בחופשיות בנתיב הירוק. קידוד צבע: כחול = יניקה בלחץ נמוך, זהב = סניקה בלחץ גבוה.

סכמטי · חתך מרידיאני, לא בקנה מידה

למה דופן מעלה נצילות

הדופן הופכת את המרווח בין הלהב לגוף לתעלה סגורה. בלי דופן, נוזל לחוץ דולף מעל קצה הלהב מהצד הלחוץ לצד היונק (tip leakage), בדיוק כמו אוויר שבורח מעל קצה כנף מטוס. כל ליטר שבורח כך הוא אנרגיה שהושקעה לחינם. דופן חוסמת את הבריחה הזו, וזה מקור יתרון הנצילות של המאיץ הסגור.

חד-יניקה מול דו-יניקה

חלוקה נוספת, בלתי תלויה בשאלת הדפנות, היא לפי מספר צידי הכניסה. מאיץ **חד-יניקה** (single-suction) מקבל נוזל מצד אחד בלבד. זה הסידור הפשוט והנפוץ. החיסרון: הלחץ פועל על הדופן האחורית של המאיץ אך לא על הצד היונק, וההפרש דוחף את כל הרוטור לכיוון היניקה. זה **הדחף הצירי** (axial thrust), שאותו צריך לשאת מסב מיוחד (פרק 8). מאיץ **דו-יניקה** (double-suction) בנוי כמו שני מאיצים גב אל גב על אותו טבור, והנוזל נכנס משני הצדדים בו-זמנית. שני יתרונות מרכזיים נובעים מכך:

דו-יניקה • המחיר

- **גוף מורכב ויקר יותר** • בדרך כלל גוף מפוצל אופקית (split-case) עם שתי תעלות יניקה.
- **שני אטמי ציר** • הציר חוצה את הגוף בשני קצותיו, ולכן שני מקומות לאטום (פרק 7).
- **רגיש יותר ליישור** • ציר ארוך הנתמך בשני קצותיו דורש יישור מדויק.

דו-יניקה • היתרונות

- **איזון דחף צירי כמעט מלא** • הלחץ זהה משני הצדדים ומבטל זה את זה. כמעט אין דחף שנשאר למסב.
- **NPSH נדרש נמוך יותר** • אותה ספיקה מתחלקת לשתי עיני יניקה, מהירות הכניסה יורדת, וסכנת הקוויטציה קטנה (פרק 14).
- **ספיקות גבוהות** • שטח כניסה כפול, מתאים לתחנות שאיבה גדולות.

כלל אצבע לדחף הצירי

הדחף הצירי על מאיץ חד-יניקה גדל בקירוב עם $\Delta p \cdot A$, כלומר שטח עין היניקה כפול הפרש הלחץ על המאיץ. מאיץ דו-יניקה מבטל את רובו בזכות הסימטריה, ולכן הוא הבחירה הקלאסית למשאבות מפוצלות-גוף (split-case) גדולות בספיקה גבוהה (פרק 11). את שאר הדחף שנותר במאיצים חד-יניקה מאזנים בחורי איזון, בלהבי גב או בדיסק איזון, נושא שלם של פרק 8.

מהירות סגולית: למה למאיץ הזה הצורה הזו

למה מאיץ של משאבת בוסטר נראה צר וגדול-קוטר, ומאיץ של משאבת ניקוז נראה רחב וכמעט כמו פרופלר? התשובה היא **מהירות סגולית** (specific speed, n_q), מספר אחד שמקשר בין מהירות הסיבוב, הספיקה והעומד, וקובע את צורת המאיץ האופטימלית.

$$n_q = n \cdot \sqrt{Q} / H^{0.75}$$

n	מהירות הסיבוב [rpm].
Q	ספיקה בנקודת ה-BEP [m^3/s]. למאיץ דו-יניקה משתמשים בחצי הספיקה.
H	עומד לדרגה אחת בנקודת ה-BEP [m].
n_q	חסר-יחידות בנוסחה האירופית. ערך נמוך = עומד גבוה וספיקה נמוכה (רדיאלי). ערך גבוה = ספיקה גבוהה ועומד נמוך (אקסיאלי).

אפשר לחשוב על המהירות הסגולית כעל "תעודת הזהות הצורנית" של המאיץ. היא לא תלויה בגודל הפיזי אלא ביחס שבין העומד לספיקה, ולכן שני מאיצים בעלי אותה n_q דומים בצורתם גם אם אחד קוטר 80 מ"מ והשני קוטר 800 מ"מ.

טבלה 5.1 • מהירות סגולית מול צורת מאיץ (כלי עזר)

N_q (אירופי)	סוג מאיץ	יחס D_2/D_1	אופייני ל
10–30	רדיאלי (radial)	2.0–3.0	בוסטר, רב-שלבי, עומד גבוה
30–60	רדיאלי-אלכסוני	1.5–2.0	משאבות מים כלליות
60–120	זרימה מעורבת (mixed)	1.2–1.5	בור, ניקוז, ספיקה בינונית
120–300	אקסיאלי (axial / propeller)	≈ 1.0	ספיקה ענקית, עומד נמוך

למה זה חשוב בשטח

הנצילות המרבית שמאיץ יכול להשיג תלויה ב- n_q שלו. השיא נמצא בערך באזור $n_q \approx 40$ –60, שם מאיצים מגיעים ל-85%–90%. במהירות סגולית נמוכה מאוד ($n_q < 15$), בוסטרים זעירים (עומד גבוה) הנצילות נופלת כי חיכוך הדיסק (פרק 4) הופך לדומיננטי. אם משאבה קטנה ועדינה מתעקשת לא לעבור 60% נצילות, ייתכן שזו לא תקלה אלא גבול פיזיקלי של מהירות סגולית נמוכה. הפתרון הנכון: מהירות סיבוב גבוהה יותר או משאבה רב-שלבית.

גוף לשון מול גוף מפזר

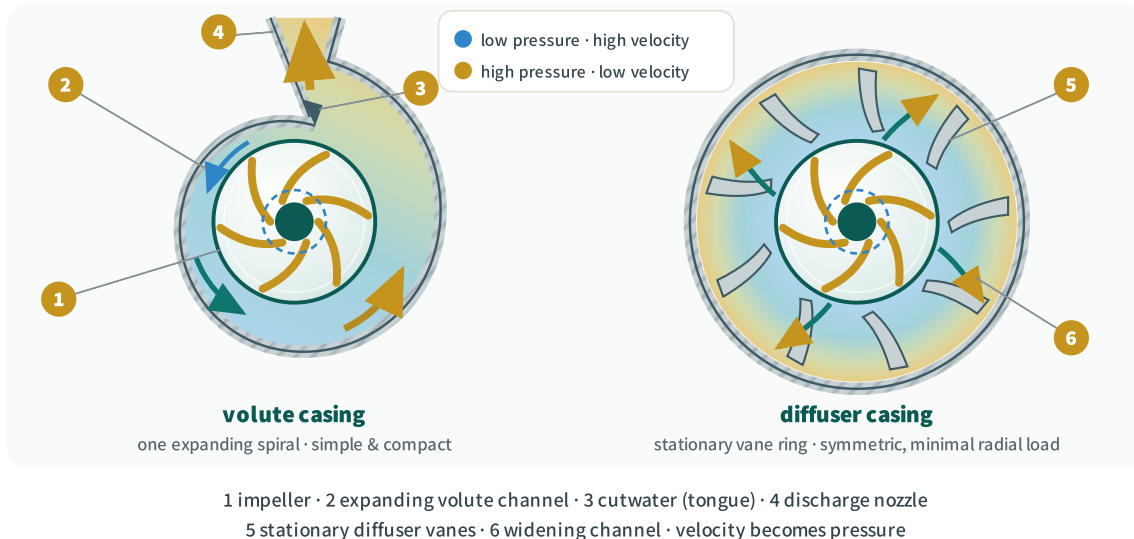
אחרי שהמאיץ זרק את הנוזל החוצה במהירות גבוהה, תפקיד הגוף הוא להאט אותו בהדרגה כדי לבנות לחץ. שתי משפחות של גופים עושות זאת בדרכים שונות.

גוף לשון (volute casing)

הגוף הספירלי הקלאסי. תעלה אחת שמתרחבת בהדרגה סביב המאיץ, כך שככל שנאסף יותר נוזל לאורך ההיקף, שטח המעבר גדל והמהירות יורדת. הנקודה שבה הספירלה "נסגרת" וחוזרת על עצמה נקראת הלשון (*cutwater / tongue*). הלשון מפרידה בין הנוזל שכבר עשה סיבוב מלא לבין זה שרק מתחיל. גוף לשון פשוט, זול וקומפקטי, ולכן הוא הבחירה כמעט תמיד למשאבה חד-שלבית.

גוף מפזר (diffuser casing)

במקום ספירלה אחת, טבעת של **להבי מפזר** (*diffuser vanes*) נייחים מקיפה את המאיץ סביב-סביב. כל תעלה בין שני להבים היא דיפוזר זעיר שמאיט את הנוזל בנפרד. הסימטריה היא היתרון הגדול: מאחר שהזרימה יוצאת אחידה לכל ההיקף, אין כיוון מועדף ולכן העומס הרדיאלי על הציר כמעט מתאפס. לכן המפזר הוא הבחירה הטבעית כשמערימים דרגות זו על זו, במשאבה רב-שלבית או במשאבת בור אנכית.

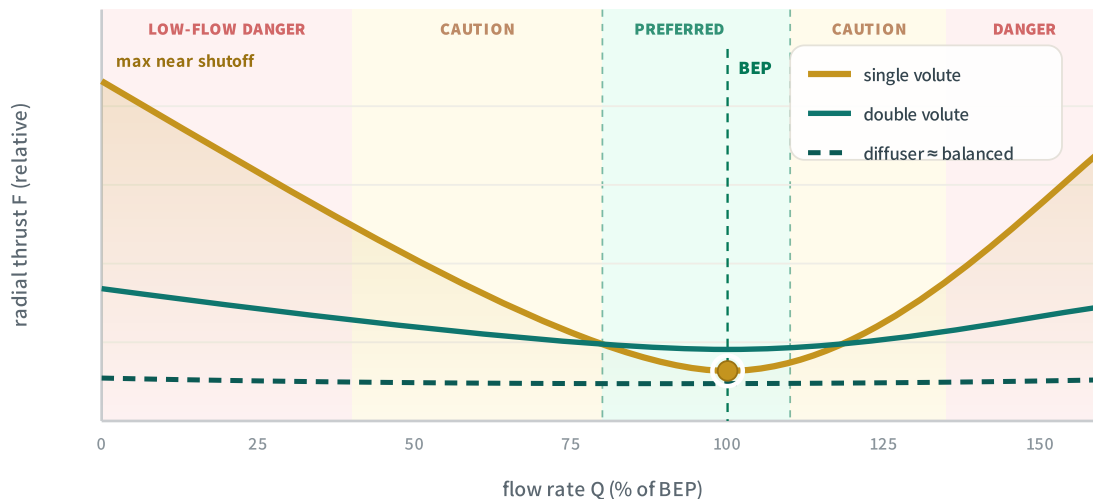


איור 5.2 · גוף לשון (volute, משמאל) מול גוף מפזר (diffuser, מימין). בלשון, תעלה ספירלית אחת מתרחבת בהדרגה לאורך ההיקף: צבע המים עובר מכחול (מהירות גבוהה, לחץ נמוך) לזהב (לחץ גבוה) ככל שהזרימה מואטת לעבר הסניקה, והלשון (cutwater) מפרידה בין תחילת הסיבוב לסופו. במפזר, טבעת להבים נייחים יוצרת תעלות מתרחבות סימטריות סביב כל ההיקף, והלחץ נבנה רדיאלית כלפי חוץ, ולכן העומס הרדיאלי על הציר כמעט מתאפס, וזו הבחירה הטבעית למשאבות רב-שלביות ולמשאבות בור.

סכמטי · מבט חזיתי, חתך דרך הגוף, לא בקנה מידה

העומס הרדיאלי: ההבדל המעשי הגדול

בגוף לשון יחיד, הזרימה אינה סימטרית. כל עוד המשאבה עובדת בדיוק ב-BEP, התרחבות הספירלה מתואמת לזרימה והכוחות סביב המאיץ מאוזנים בקירוב. אבל ברגע שזזים מ-BEP, התיאום נשבר. בספיקה נמוכה הלחץ סביב ההיקף לא אחיד, ונוצר כוח רדיאלי שדוחף את הציר לכיוון אחד. בספיקה גבוהה הכוח מופיע בכיוון ההפוך.



איור 5.3 · עומס רדיאלי מול ספיקה, לשלוש גישות הגוף. בגוף לשון יחיד (זהב, עם מילוי) הכוח מינימלי בדיוק ב-BEP (הנקודה המוקפת) אך מטפס בחדות לשני הכיוונים, והוא מרבי ליד ספיקת אפס. גוף לשון כפול (טורקיז) שומר על עומס נמוך לכל הטווח, וגוף מפזר (מקווקו) מאוזן כמעט לחלוטין. רצועות הרקע מסמנות את חלון העבודה: ירוק = הטווח המועדף (כ-80%–110% מה-BEP), ענבר = זהירות, אדום = סכנה למסבים ולאטמים.

סכמטי · מבוסס על מגמת Hydraulic Institute / Karassik

גוף לשון כפול (double volute)

הפתרון הביניים החכם. מוסיפים לשון שנייה במרחק 180° מהראשונה, כך שהספירלה מחולקת לשני חצאים סימטריים. שני הכוחות הרדיאליים מנוגדים ומבטלים זה את זה ברובם, בלי המורכבות והעלות של מפזר מלא. מחיר קטן בנצילות (מחיצת הלשון השנייה תופסת מקום וגורמת מעט חיכוך), אבל הרווח גדול: ציר רגוע, מסבים ואטמים שמחזיקים שנים. רוב המשאבות מפוצלות-הגוף הבינוניות-גדולות הן double-volute בדיוק מהסיבה הזו.

טבלה 5.2 · שלוש גישות הגוף, במבט מהיר

גוף	עומס רדיאלי	מורכבות / עלות	נפוץ ב
לשון יחידה (single volute)	גבוה מחוץ ל-BEP	נמוכה	משאבה חד-שלבית, ספיקה קטנה-בינונית
לשון כפולה (double volute)	נמוך לכל הטווח	בינונית	משאבות מפוצלות-גוף בינוניות-גדולות
מפזר (diffuser)	נמוך ומאוזן	גבוהה	רב-שלבי, בור אנכי, עומד גבוה

דרגות במשאבה רב-שלבית

מאיץ בודד מייצר עומד מוגבל. ככל שמסובבים אותו מהר יותר או מגדילים את קוטרו, אפשר להוציא ממנו יותר עומד, אך בשלב מסוים מגיעים לגבול מעשי של מהירות היקפית ושל מאמצים מכניים. הפתרון לעומדים גבוהים הוא לחבר כמה מאיצים בטור על אותו ציר, כך שהציאה של דרגה אחת מזינה את הכניסה של הבאה.

כל **דרגה (stage)** מוסיפה בקירוב את אותו עומד, ולכן **העומדים מתחברים בטור** בעוד הספיקה נשארת קבועה לכל אורך השרשרת. זה ההפך מחיבור משאבות במקביל, שם הספיקות מתחברות (פרק 17).

נוסחה 5.2 • עומד של משאבה רב-שלבית

$$H_{total} = Z \cdot H_{stage}$$

H_{total} העומד הכולל של המשאבה [m].
 Z מספר הדרגות (מאיצים בטור).
 H_{stage} העומד שמייצרת דרגה אחת בנקודת העבודה [m]. הספיקה זהה בכל הדרגות.

דוגמה 5.1 • כמה דרגות צריך לקידוח עמוק

קידוח מים דורש משאבה טבולה שתרים מים מעומק דינמי של 168 מטר אל מאגר עילי, בספיקה של 40 m³/h. מסדרת מאיצים נתונה, כל דרגה מייצרת כ-28 m עומד בנקודת העבודה הזו. כמה דרגות צריך, ומה הספיקה בכל דרגה?

$$Q = 40 \text{ m}^3/\text{h} \quad H_{stage} = 28 \text{ m} \quad H_{total} = 168 \text{ m}$$

1 מספר הדרגות הנדרש מנוסחה 5.2:

$$Z = H_{total} / H_{stage} = 168 / 28 = 6 \text{ stages}$$

2 הספיקה זהה בכל דרגה (חיבור בטור, לא במקביל):

$$Q_{stage} = Q_{total} = 40 \text{ m}^3/\text{h}$$

3 בדיקת שפיות: שש דרגות בטור על ציר אחד, אורך גוף סביר לקידוח:

$$6 \times 28 = 168 \text{ m} \quad \checkmark$$

תוצאה: 6 דרגות, כל אחת בספיקה מלאה של 40 m³/h. שים לב שאילו היה צריך עומד כפול, היינו מוסיפים דרגות, לא מגדילים את הספיקה. **בטור: העומדים מתחברים, הספיקה קבועה.**

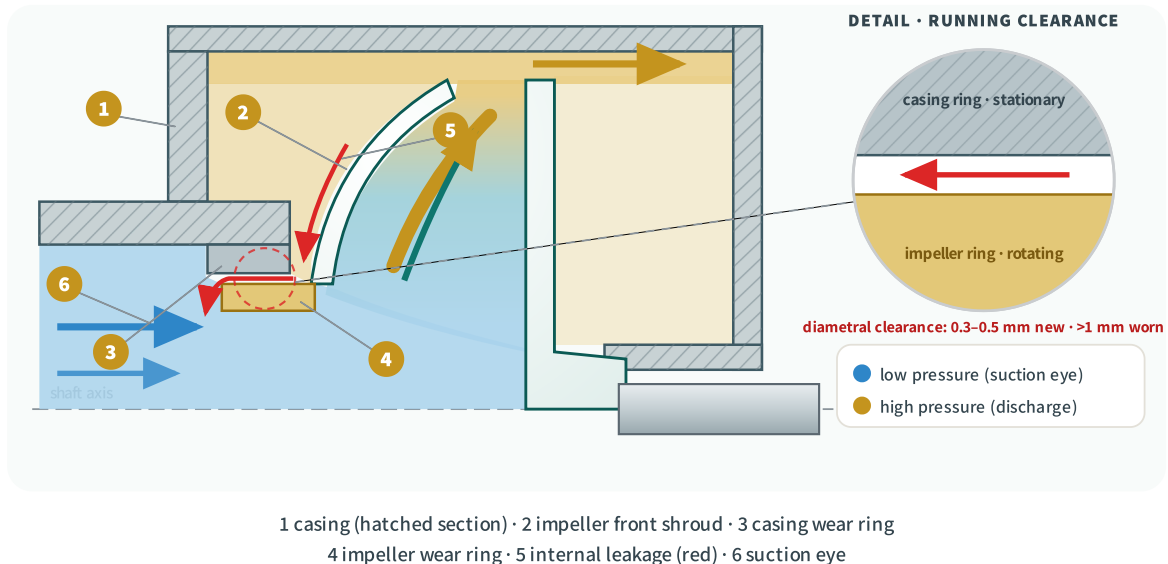
ולמה מפזר ולא לשון? בשש דרגות צמודות אין מקום לספירלת לשון לכל מאיץ, וכל עומס רדיאלי לא מאוזן היה מתעצם פי שש לאורך הציר הארוך. לכן משאבות בור ורב-שלביות משתמשות כמעט תמיד בגופי מפזר סימטריים (איור 5.2).

טבעות שחיקה ומרווחי ריצה

בין המאיץ המסתובב לגוף הנייח חייב להיות מרווח פיזי, אחרת הם יתחככו. אבל דרך אותו מרווח בדיוק, נוזל בלחץ גבוה בצד הלחץ של המאיץ דולף בחזרה אל עין היניקה בלחץ נמוך. זו

הנזילה הפנימית שיוצרת את **האיבוד הנפחי** מפרק 4. ככל שהמרווח גדול יותר, כך הנזילה גדולה יותר והנצילות נמוכה יותר.

כדי לשלוט במרווח הזה ולהגן על המאיץ היקר, מתקנים **טבעות שחיקה** (*wear rings*). אלה טבעות מתכת מתחלפות, אחת על המאיץ ואחת בגוף, שיוצרות יחד מרווח קטן ומדויק. כשהן נשחקות, מחליפים את הטבעות הזולות במקום את המאיץ והגוף היקרים.



איור 5.4 · נתיב הנזילה הפנימית בחתך אורך (חצי עליון). נוזל זהוב בלחץ גבוה מהיקף המאיץ יורד לאורך חזית הדופן הקדמית, נדחק דרך מרווח טבעות השחיקה (חיצים אדומים) וחוזר אל עין היניקה הכחולה בלחץ נמוך, אנרגיה שהושקעה ואבדה. עיגול ה-DETAIL מגדיל את צמד הטבעות: טבעת הגוף הנייחת מול טבעת המאיץ המסתובבת, עם מרווח קוטרי (דיאטרלי) של 0.3–0.5 mm במצב חדש. ככל שהטבעות נשחקות המרווח גדל, הנזילה עולה והנצילות יורדת בשקט. הטבעת האחורית (לא מוצגת) שולטת בנזילה לתא האטם ובדחף הצירי.

סכמטי · חתך אורך, חצי עליון בלבד, המרווח מוגזם לצורך ההמחשה

טבעת קדמית וטבעת אחורית

למאיץ סגור טיפוסי יש שתי משפחות טבעות. **הטבעת הקדמית** (front / suction ring) יושבת ליד עין היניקה ושולטת בנזילה העיקרית מההיקף הלחץ בחזרה ליניקה, זו שבאיור 5.4. **הטבעת האחורית** (back / hub ring), כשהיא קיימת, שולטת בנזילה לאורך גב המאיץ לכיוון תא האטם, ובכך גם משפיעה על הדחף הצירי (פרק 8). מאיצים עם **חורי איזון** (*balance holes*) בגב מנקזים את הלחץ דרך הטבעת האחורית כדי להקטין את הדחף.

המרווח הוא הפריט המתחדש מספר 1

זה אולי הרעיון המעשי החשוב ביותר בפרק. **מרווח טבעת השחיקה הוא הדרך הזולה והמהירה ביותר להחזיר נצילות למשאבה ותיקה**. מרווח טיפוסי במצב חדש הוא 0.3–0.5 mm בקוטר. כשהוא נשחק לכ-1.0–1.5 mm, הנזילה הפנימית יכולה להכפיל את עצמה, והנצילות יורדת ב-3 עד 8 נקודות אחוז בלי שום סימן חיצוני. החלפת זוג טבעות שחיקה עולה שבריר ממחיר מאיץ חדש, ולעיתים קרובות מחזירה את המשאבה אל מעל הסף הרגולטורי. כשבדיקת נצילות (פרק 24) מראה ירידה הדרגתית בלי קוויטציה ובלי תקלת מנוע, טבעות השחיקה הן החשוד הראשון.

מאיצים מיוחדים לביוב ולמוצקים

שאיבת שפכים, בוצה ונוזלים עם סיבים היא עולם בפני עצמו. כאן הסכנה הגדולה אינה נצילות נמוכה אלא **סתימה**: סמרטוט, מגבונים לחים או גוש סיבים שנתקעים בין הלהבים ועוצרים את המשאבה. לכן פותחו מאיצים ייעודיים, וכולם מקריבים נצילות תמורת מעבר חופשי גדול יותר. הממד המרכזי הוא **קוטר המעבר החופשי** (*free / solids passage, mm*), הכדור הגדול ביותר שיכול לעבור דרך המאיץ בלי להיתקע.

טבלה 5.3 • מאיצי ביוב לפי מעבר חופשי ונצילות (כלי עזר)

סוג מאיץ	מעבר חופשי	נצילות יחסית	שימוש אופייני
תעלה (channel / multi-vane)	80–100 mm	הגבוהה בקבוצה	שפכים עירוניים, תחנות הרמה גדולות
להב יחיד (single-vane)	100–160 mm	בינונית	שפכים גולמיים, מוצקים גדולים
מערבולת (vortex)	קוטר היציאה ≈	הנמוכה (40%–55%)	בוצה סיבית, מוצקים גסים, נוזל שוחק
טוחן (grinder)	טוחן ל-10 mm	נמוכה	קווי לחץ דקים, בארות שאיבה קטנות

1 תעלה (channel)

מאיץ סגור עם להב או שניים ותעלות רחבות מאוד. הנצילות הגבוהה ביותר מבין מאיצי הביוב, ולכן מועדף בתחנות גדולות שבהן צריכת האנרגיה מצדיקה זאת.

2 להב יחיד (single-vane)

להב ספירלי בודד יוצר מעבר ענק וכמעט בלתי-נסתם. מאוזן בקפידה כי להב אחד יוצר חוסר איזון, אך הוא סוס העבודה של שפכים גולמיים.

3 מערבולת (vortex)

המאיץ נסוג אל תוך הגוף, והנוזל מונע בעיקר על ידי מערבולת ולא במגע ישיר. כמעט בלתי-נסתם ועמיד בשחיקה, אך הנצילות צונחת ל-40%–55% בלבד.

4 טוחן (grinder)

סכיני חיתוך בכניסה מרסקים את המוצקים לחלקיקים קטנים, ואז מאיץ רגיל שואב אותם דרך קו לחץ דק. שימושי כשהקו צר אך מחיר אנרגטי גבוה.

לכידה הנדסית בשפכים

אל תבחר מאיץ ביוב לפי נצילות בלבד. תחנת הרמה שנסתמת פעם בשבוע גוררת קריאת חירום, שאיבת ביוב לרחוב ועלות שירות שמגמדת כל חיסכון אנרגטי. הכלל המעשי: ודא שהמעבר החופשי גדול מהמוצק הגדול ביותר שצפוי בזרם (לרוב 80–100 mm $\geq$ לשפכים עירוניים), ורק אז מטב את הנצילות. **אמינות לפני נצילות, ואז נצילות בתוך מה שהאמינות מתירה.**

בחירת מאיץ וגוף לפי יישום

נסכם את כל ההחלטות לכלי עבודה אחד. הטבלה הבאה ממפה יישום נפוץ אל צירוף המאיץ והגוף המתאים, ומסבירה את ההיגיון מאחורי כל בחירה. זו נקודת הפתיחה לפרק 16, שם נבחר משאבה שלמה לנקודת עבודה אמיתית.

טבלה 5.4 • בחירת מאיץ וגוף לפי יישום

יישום	מאיץ	גוף	למה
בוסטר / הגברת לחץ במים נקיים	סגור, חד-יניקה	לשון יחידה	נצילות מקסימלית, נוזל נקי, ספיקה קטנה-בינונית
תחנת שאיבה גדולה, ספיקה גבוהה	סגור, דו-יניקה	לשון כפולה / split-case	איזון דחף צירי ורדיאלי, NPSH נדרש נמוך
קידוח / בור עמוק (עומד גבוה)	סגור, רב-שלבי	מפזר	העומדים מתחברים בטור, סימטריה לאורך הציר
מים עם חול / מוצקים קלים	חצי-פתוח	לשון יחידה	מרווח חזיתי מתכוונן, פחות רגיש לשחיקה
שפכים עירוניים	תעלה / להב-יחיד	לשון יחידה רחבה	מעבר חופשי $\leq 80 \text{ mm}$, התנגדות לסתימה
בוצה סיבית / נוזל שוחק	vortex (פתוח)	לשון יחידה	כמעט בלתי-נסתם, עמיד בשחיקה, נצילות משנית

קישורים בספר

הדחף הצירי והרדיאלי שהוזכרו כאן מטופלים במלואם בפרק 8. עקומות המאפיין שכל צירוף מאיץ-גוף מייצר נקראות בפרק 12, וחוקי הדמיות שמסבירים את צורת המאיץ בפרק 13. NPSH ועין היניקה בפרק 14. חיבור משאבות בטור ובמקביל, ההמשך הישיר של "דרגות", בפרק 17. בחירת משאבה שלמה לנקודת עבודה בפרק 16. בלאי טבעות השחיקה והחזרת הנצילות הם לב פרק 9 (חומרים ושחיקה) ופרק 24 (בדיקת נצילות).

אז מה? הגיאומטריה היא גורל, אבל המרווח הוא הזדמנות. סוג המאיץ מכריע בין נצילות לעמידות בסתימה, סוג הגוף מכריע איך מאזנים עומסים ומערימים דרגות, והמהירות הסגולית מסבירה למה לכל אלה יש בכלל צורה כזו. אבל הפריט שמחזיר הכי הרבה נצילות בהכי מעט כסף הוא טבעת השחיקה. כשתבדוק משאבה ותיקה ותמצא ירידת נצילות הדרגתית, אל תמהר להחליף את המשאבה. מדוד את מרווחי הטבעות קודם. לעיתים קרובות 0.5 מ"מ של בלאי עומדים בין המתקן לבין הסף הרגולטורי.

6 צירים, מסבים, מצמדים ותושבות

Shafts, Bearings, Couplings & Baseplates

בקצרה

בפרק הקודם הכרנו את החלקים ההידראוליים. עכשיו נכיר את **השלד שמחזיק אותם ומסובב אותם**: הציר שמעביר את המומנט, המסבים שתומכים בו, המצמד שמחבר אותו למנוע, והתושבת שמקבעת את הכול ליסוד.

אלה לא רכיבים זוהרים, אבל הם מקור התקלות מספר אחת בשטח. **רוב כשלי המסבים והאטמים אינם נובעים מהמסב או מהאטם עצמם, אלא מיישור מצמד לקוי, מתושבת רכה או מיסוד חלש.** מי שמבין את הפרק הזה מונע את התקלות לפני שהן קורות.

הציר והשרוול: עמוד השדרה המסתובב

כל המומנט שהמנוע מייצר עובר דרך גליל פלדה אחד. אם הוא יכשל, הכול עוצר. לכן הציר הוא אחד הרכיבים הקריטיים ביותר במשאבה.

הציר (shaft) מעביר את מומנט הסיבוב מהמנוע אל המאיץ, ובו זמנית סופג את הכוחות הרדיאליים והצינניים שנוצרים בזרימה. הוא חייב להיות נוקשה מספיק כדי כמעט לא להתכופף בעומס, וחזק מספיק כדי לא להתעייף לאורך שנים של סיבוב. לרוב הוא עשוי פלדת פחמן או פלב"ם, ובמים תוקפניים פלב"ם דופלקס.

שני גדלים מגדירים אם הציר טוב: **השקיעה** שלו בעומס (כמה מילימטרים הוא מתכופף), ו**המהירות הקריטית** שלו, מהירות הסיבוב שבה הוא נכנס לתהודה ומתחיל לרטוט בעוצמה. מתכננים תמיד שהמהירות הקריטית הראשונה תהיה רחוקה מהותית ממהירות העבודה. את כל נושא המהירות הקריטית והדינמיקה הרוטורית נפתח לעומק בפרק 8.

שרוול הציר (shaft sleeve): שכבת ההקרבה

במקום שבו הציר עובר דרך אטם האיטום, פני הציר נשחקים מהמגע עם האטם המכני או עם אריגת המוך. במקום להקריב את הציר היקר עצמו, מלבישים עליו **שרוול ציר (shaft sleeve)**: שרוול גלילי דק, לרוב מפלב"ם מוקשה או מצופה קרמיקה, שמתברג או נדחף על הציר באזור האטם.

למה שרוול ולא ציר חשוף

השרוול הוא **חלק מתכלה מתוכנן**. כשהוא נשחק מחליפים אותו בעשרות שקלים תוך כדי שיפוץ אטם, במקום להחליף ציר שלם שעולה פי כמה ודורש איזון מחדש. בעת שיפוץ, החלפת שרוול הציר היא כמעט תמיד צעד מובן מאליו, גם אם הוא נראה "עוד בסדר".

מסבים: על מה הציר נשען

הציר לא יכול לרחף. הוא נתמך בשני קצותיו על ידי **מסבים** (*bearings*), רכיבים שמאפשרים לו להסתובב בחופשיות אבל מקבעים אותו במרחב. כדי להבין מסבים צריך קודם להבין אילו כוחות הם סופגים, כי כל מסב מתמחה בכיוון אחר.

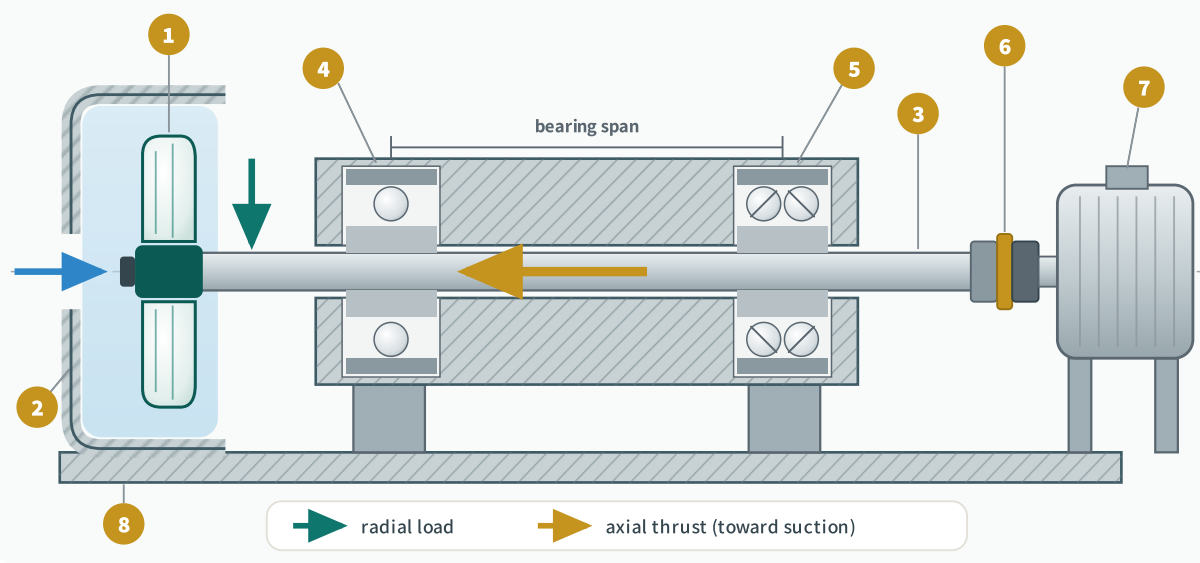
עומס רדיאלי *radial load*

כוח שמושך את הציר הצידה, בניצב לציר הסיבוב. נוצר מהפרש לחצים סביב המאיץ, חזק במיוחד הרחק מנקודת העבודה המיטבית (פרק 8).

עומס צירי / דחף *axial / thrust load*

כוח שדוחף את הציר לאורכו, לכיוון עין היניקה. נוצר מהפרש הלחצים בין שני צידי המאיץ. במשאבות רב-שלביות ובמשאבות בור הוא עצום.

במשאבה אופקית טיפוסית, את שני המסבים מציבים בקצוות הציר. הקצה הקרוב למנוע נקרא **קצה ההנעה** (*drive-end, DE*), והקצה המרוחק נקרא **קצה לא-מניע** (*non-drive-end, NDE*). בדרך כלל המסב הפנימי, הקרוב למאיץ, הוא מסב רדיאלי בלבד; המסב החיצוני, בצד המצמד, הוא מסב משולב (לרוב זוג מסבי מגע זוויתי) שנעול לציר ולבית, נושא גם דחף צירי וגם ממקם את הציר. כך כל מסב עושה את העבודה שאליו הוא הכי מתאים.



איור 6.1 · חתך רכבת ההנעה במשאבה אופקית עם מאיץ תלוי: המים (כחול) נכנסים לעין המאיץ, והשלד נושא את הכוחות. חץ טורקיז = עומס רדיאלי; חץ זהב = דחף צירי הפועל לכיוון היניקה. המסב הפנימי, הקרוב למאיץ (מס' 4), סופג עומס רדיאלי בלבד; המסב החיצוני, בצד המצמד (מס' 5, זוג מסבי מגע זוויתי), נעול לציר ולבית, סופג רדיאלי + צירי וממקם את הציר.

סכמטי · משאבה אופקית חד-שלבית טיפוסית

1

מסבי גלגול (rolling-element)

כדורים או גלילים בין שתי טבעות. הנפוצים ביותר במשאבות מים. זולים, מדויקים, סובלים עומס נקודתי. מסב מגע זוויתי (angular contact) או מסב כדורי דו-טורי סופגים דחף צירי. אורך חיים מוגדר וצפוי (ראה L10 בהמשך).

2

מסבי החלקה / יומן (sleeve / journal)

הציר מחליק על שכבת שמן דקה בתוך פגז, בלי גלגול. שקטים, סופגים עומסים גדולים ורציפים, אורך חיים כמעט בלתי מוגבל כל עוד שכבת השמן נשמרת. נפוצים במשאבות גדולות מאוד ובמשאבות בור עם מסבי מים לאורך עמוד הקידוח.

3

מסבים מגנטיים (magnetic)

שדה מגנטי מרחיף את הציר בלי מגע פיזי. אפס חיכוך, אפס שמן, חיישנים מובנים. יקרים ומורכבים, שמורים למשאבות תהליך קריטיות ולמדחסי גז. נדירים מאוד במים, אבל מייצגים את הקצה המתקדם של הטכנולוגיה.

סיכה: גריז מול שמן, ואיך הורגים מסב באהבת יתר

מסב גלגול לא נשחק מהמגע בין המתכות. שכבת סיכה דקה מפרידה בין הכדורים לטבעות, וכל החיים של המסב תלויים בשכבה הזו. שתי שיטות סיכה שולטות בשטח: גריז ושמן.

גריז (grease)

- פשוט, אטום, לא דורש מאגר. מתאים לרוב משאבות המים.
- אוטם מפני אבק ומים מבחוץ.
- תחזוקה: גירוז חוזר תקופתי, או מסב "אטום לכל החיים" שלא נוגעים בו.
- גבול: עד כ-3,600 rpm וטמפרטורות מתונות.

שמן (oil)

- מפנה חום טוב יותר, מתאים למהירות גבוהה ולעומס כבד.
- דורש מאגר, מפלס ואיטום (לעיתים טבעת שמן או ערפל שמן).
- תחזוקה: בדיקת מפלס, צבע ולכלוך, החלפה תקופתית.
- רגיש לדליפות וכניסת מים, דורש משמעת תחזוקה גבוהה יותר.

הטעות הנפוצה: יותר גריז זה לא יותר טוב

הסיבה השכיחה ביותר לכשל מוקדם של מסב גלגול היא דווקא **עודף גריז**, לא מחסור. כשממלאים את בית המסב בגריז עד הסוף, הכדורים נאלצים "לחתור" דרך גוש סמיך. החיכוך הפנימי מקפיץ את הטמפרטורה, הגריז מתפרק, השמן הבסיסי בורח, ונשאר מסב יבש שנשרף. הכלל: למלא רק כ-שליש **עד מחצית** מהנפח הפנוי, ולתת לעודף לברוח דרך פקק הניקוז. אהבת יתר הורגת מסבים.

אורך חיים צפוי (L10 life)

היופי במסב גלגול הוא שאורך החיים שלו צפוי סטטיסטית. החיי **L10** (*rating life*) הם מספר השעות שבסופן **90 אחוז** מאוכלוסיית מסבים זהים, בעומס ובמהירות נתונים, עדיין יעבדו בלי כשל עייפות. כלומר, סיכוי של 10 אחוז לכשל ראשון עד מועד ה-L10. תקן API 610 למשאבות תהליך דורש $L_{10} \geq 25,000$ h בעבודה רציפה בתנאים נקובים, ולפחות 16,000 h בעומסים המרביים ובמהירות הנקובה. רוכשים מחמירים מבקשים היום 40,000 h ומעלה.

נוסחה 6.1 • חיי מסב גלגול

$$L_{10} = (C / P)^p \times 10^6 / (60 \cdot n)$$

C	קיבולת עומס דינמית של המסב [N], מקטלוג היצרן.
P	העומס השקול שפועל על המסב [N] (שילוב רדיאלי וצירי).
p	מעריך: 3 למסב כדורי, 10/3 למסב גלילי.
n	מהירות הסיבוב [rpm]. הביטוי הימני ממיר מיליוני סיבובים לשעות.

דוגמה 6.1 • אורך חיים צפוי של מסב במשאבת בוסטר

מסב כדורי בקצה ההנעה של משאבת בוסטר עירונית. נבדוק כמה שעות הוא צפוי להחזיק לפי נתוני הקטלוג ועומס העבודה.

(קיבולת דינמית) $C = 75,600$ N (עומס שקול) $P = 4,200$ N (מסב כדורי) $p = 3$ $n = 2,950$ rpm

1 יחס העומס: $C / P = 75,600 / 4,200 = 18.0$

2 מעריך החיים (מסב כדורי):

$$(C/P)^3 = 18.0^3 = 5,832 \quad (\times 10^6 \text{ rev})$$

3 המרה לשעות: $L_{10} = 5,832 \times 10^6 / (60 \times 2,950) \approx 33,000$ h

תוצאה: **$L_{10} \approx 33,000$ h**, כ-3.8 שנות עבודה רציפה. עומד בדרישת API 610 ($\leq 25,000$ h). **הערה חשובה:** זהו אורך חיים תאורטי בהנחת סיכה מושלמת ויישור מושלם. בשטח, יישור גרוע או עודף גריז יכולים לקצץ אותו לחצי ואף פחות.

הלך המעשי: כשמסב מת אחרי שנה במקום אחרי ארבע, הבעיה כמעט אף פעם איננה המסב. חפשו את הסיבה ביישור, בסיכה או בעומס רדיאלי חריג מעבודה רחוק מנקודת העבודה המיטבית.

נושא	גריז (GREASE)	שמן (OIL)
בדיקה ויזואלית	שבועי-חודשי (חום, רעש, רעידות)	שבועי (מפלס, צבע, דליפה)
גירוז / החלפה חוזרת	2,000–4,000 h	4,000–8,000 h
החלפה / רענון מלא	בכל שיפוץ אטם	8,000 h
כמות מילוי	נפה ½–¾	עד אמצע הכדור התחתון
טמפ' אזהרה	> 70 °C	> 80 °C
מסב "אטום לכל החיים"	אין תחזוקה · מחליפים כמכלול	–

כלל אצבע לטמפרטורת מסב

אם אי אפשר להחזיק יד על בית המסב יותר משלוש שניות, הוא חם מדי, מעל 60°C. זו אבחנת שטח גסה אבל יעילה. מד טמפרטורה אינפרא-אדום זול הופך אותה למספר. עלייה הדרגתית בטמפרטורת מסב לאורך שבועות היא תמרור אזהרה מובהק לכשל מתקרב, ראו ניטור מצב בפרק 23.

מצמדים ויישור: החוליה שמחברת ומפרידה

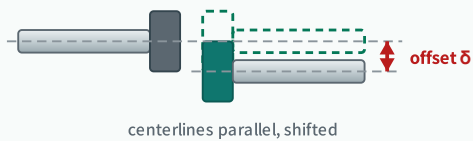
המנוע והמשאבה הם שני גופים נפרדים, כל אחד עם הצירים והמסבים שלו. ה **מצמד (coupling)** מחבר ביניהם ומעביר את המומנט, אבל גם מבודד אותם זה מזה.

מצמד נוקשה היה דורש יישור מושלם בלתי אפשרי, ולכן כמעט תמיד משתמשים ב **מצמד גמיש (flexible coupling)**. אלמנט גמיש בתווך, גומי, סיכות, גלגלי שיניים או דיסקית מתכת, סופג סטיות יישור קטנות, מפצה על התפשטות תרמית, ומרכז זעזועים. אבל חשוב להבין: מצמד גמיש **סובל** אי-יישור, הוא לא **מתקן** אותו. כל מעלה של אי-יישור מתורגמת לכוח שעובר אל המסבים והאטמים.

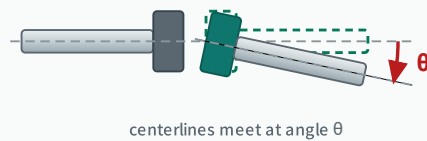
שלושת סוגי אי-היישור

אי-יישור בין שני צירים מתפרק תמיד לשלושה רכיבים, ובשטח מופיע שילוב שלהם. צריך להכיר את שלושתם כי כל אחד מאובחן ומתוקן אחרת.

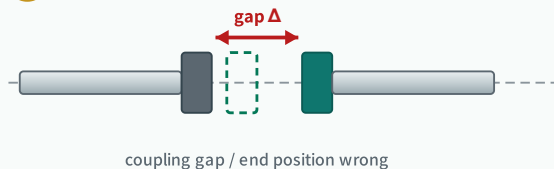
1 PARALLEL (OFFSET)



2 ANGULAR



3 AXIAL (END FLOAT)



- motor shaft / hub
- pump shaft / hub
- aligned reference (ghost)
- ↔ misalignment dimension

1 parallel offset · 2 angular · 3 axial end float (green dashes = correctly aligned position)
red dimensions = the error to correct · real installations combine all three

איור 6.2 · שלושת רכיבי אי-היישור בין ציר המנוע (אפור) לציר המשאבה (טורקיז). הקו המקווקו הירוק מסמן את המיקום המיושר הנכון ("רוח רפאים"), והמידות האדומות את הסטייה שיש לתקן: היסט מקבילי δ , זווית θ , ומרווח צירי שגוי Δ . בשטח מופיע תמיד שילוב של השלושה.

סכמטי · להמחשת העיקרון

1 אי-יישור מקבילי / היסט (parallel / offset)

שני הצירים מקבילים אבל מרכזיהם אינם על אותו קו. נמדד במילימטרים של היסט. גורם לכוח רדיאלי מסתובב שמתיש מסבים ואטמים.

2 אי-יישור זוויתי (angular)

צירי הצירים נפגשים בזווית. הפנים של חצאי המצמד אינן מקבילות. נמדד כפער בין פתיחת הפנים. גורם לעומס דחף מתחלף ולכיפוף הציר בכל סיבוב.

3 אי-יישור צירי / ריחוף קצה (axial / end-float)

המרווח בין חצאי המצמד אינו נכון, או שהציר נע קדימה ואחורה לאורכו. גורם לעומס צירי על המסבים ולשחיקת המצמד עצמו.

אי-יישור הוא הרוצח השקט של מסבים ואטמים

הכוחות שאי-יישור יוצר במצמד עוברים ישירות אל המסבים ואל האטם המכני. התוצאה: מסב שמת הרבה לפני ה-L10 שלו, אטם שמטפטף, רעידות מוגברות, רעש, וחשבון חשמל גבוה יותר מהחיכוך המיותר. מחקרי שטח מייחסים חלק גדול מאוד מכשלי המסבים והאטמים בדיוק לכאן. **יישור לקוי לא מתבטא מיד.** המשאבה תעבוד חודשים, ואז "פתאום" המסב נשרף. הסיבה האמיתית נקבעה ביום ההתקנה.

יישור לייזר ו"רגל רכה"

פעם יישרו עם סרגל ומד-שעון (rim & face). היום הסטנדרט המקצועי הוא **יישור לייזר** (*laser shaft alignment*): פולט לייזר על ציר אחד וגלאי על השני, והמערכת מחשבת בזמן אמת את ההיסט והזווית בשני מישורים בדיוק של מיקרונים, ומראה לטכנאי בדיוק כמה לתקן בכל רגל. מה שלקח שעה עם מד-שעון נעשה בדקות, ובדיוק גבוה בהרבה. אבל לפני שמיישרים בכלל, חובה לבדוק **רגל רכה** (*soft foot*): מצב שבו אחת מארבע רגלי המנוע אינה נשענת באמת על התושבת, כמו שולחן מתנדנד. מהדקים את הבורג, והמסגרת מתעוותת, וכל היישור שעשית נהרס. בודקים רגל רכה במד-שעון תוך כדי שחרור והידוק כל בורג בנפרד, ומפצים בפלטות פלדה דקות (shims) עד שכל ארבע הרגליים יושבות. **רגל רכה לפני יישור = יישור שווה לכלום.**

סדר הפעולות הנכון בהתקנה

1. לוודא שהתושבת מפולסת ומעוגנת ליסוד.
2. לבדוק ולתקן **רגל רכה** בכל ארבע רגלי המנוע.
3. ליישר את הצירים בלייזר, קודם זוויתי ואז מקבילי, בשני מישורים.
4. לחזור על המדידה אחרי חימום (יישור חם מול קר עלול להשתנות).
5. לתעד את ערכי היישור הסופיים בכרטיס המשאבה.

תושבת, יציקת מילוי ויסוד: על מה הכול עומד

כל ההידראוליקה, כל היישור המדויק וכל המסבים מסתמכים על דבר אחד: שהמנוע והמשאבה לא יזוזו זה ביחס לזה. את הקשיחות הזו מספקים שלושה רכיבים מקוננים: התושבת, יציקת המילוי והיסוד.

משטח בסיס / תושבת · baseplate

מסגרת פלדה אחת שעליה מורכבים גם המשאבה וגם המנוע, כך ששניהם שומרים על יישור יחסי. רגליה מעוגנות ליסוד בברגי עיגון.

יציקת מילוי · grout

מילוי (לרוב על בסיס מלט או אפוקסי) שיוצקים אל מתחת לתושבת ובתוכה, כדי לקבע אותה ליסוד ללא חללים ולהעביר את כל הרעידות אל הבטון.

יסוד · foundation

גוש בטון מסיבי באדמה. תפקידו לספוג רעידות ולשמור את היחידה דוממת. ככל שהוא כבד יותר, כך הוא בולע יותר אנרגיית רעידה.

כלל אצבע ליסוד

כלל ותיק בהנדסת משאבות: מסת היסוד צריכה להיות **פי 3 עד 5** ממסת המשאבה והמנוע יחד. יסוד כבד ונוקשה הוא "קרקע" לרעידות, הוא מוריד את משרעת הרעידה ומרחיק את תדר התהודה של המבנה מההירות העבודה. יסוד קל מדי הופך לקפיץ שמגביר רעידות במקום לבלוע אותן.

$$m_{\text{found}} = k \cdot (m_{\text{pump}} + m_{\text{motor}}) , \quad k = 3 \dots 5$$

m_{pump} מסת המשאבה כולל הנוזל בתוכה [kg].

m_{motor} מסת המנוע [kg].

k מקדם: 3 ליחידות קטנות ושקטות, 5 ומעלה ליחידות גדולות, מהירות גבוהה או רגישות לרעידות.

דוגמה 6.2 • מסת יסוד לתחנת שאיבה

מתכננים יסוד למשאבת בוסטר אופקית עם מנוע 75 kW. נחשב את מסת היסוד המינימלית המומלצת.

$$m_{\text{pump}} = 320 \text{ kg} \quad m_{\text{motor}} = 480 \text{ kg} \quad k = 4 \text{ (יחידה בינונית)}$$

$$1 \quad m_{\text{unit}} = 320 + 480 = 800 \text{ kg} \quad \text{מסת היחידה המסתובבת:}$$

$$2 \quad m_{\text{found}} = 4 \times 800 = 3,200 \text{ kg} \quad \text{מסת יסוד מומלצת:}$$

$$3 \quad V = 3,200 / 2,400 \approx 1.33 \text{ m}^3 \quad (\rho \approx 2,400 \text{ kg/m}^3) \quad \text{נפח בטון נדרש}$$

תוצאה: יסוד של כ- **3,200 kg**, בערך 1.33 m^3 בטון. למשל יציקה במידות $1.6 \times 1.0 \times 0.85 \text{ m}$. פני היסוד חורגים מקווי המתאר של התושבת בכל הכיוונים, ובולטים מעל הרצפה כדי לנקז דליפות.

למה זה חשוב כלכלית: יסוד שעולה כמה אלפי שקלים מונע שנים של רעידות שאוכלות מסבים ואטמים. החיסכון אינו בחשבון הראשוני אלא במניעת תקלות חוזרות לאורך עשור.

ברגי עיגון ויציקה נכונה

ברגי העיגון (anchor bolts) קושרים את התושבת ליסוד. הם נוצקים בתוך הבטון או מותקנים בקדחים עם דבק כימי. אחרי שמיקמו את התושבת ופילסו אותה, יוצקים את ה-grout אל החלל שמתחתיה, ללא בועות אוויר, כדי שהמגע יהיה רציף. תושבת שמונחת על הבטון בלי יציקה מתחתיה משאירה חללים, והם נעשים "תופים" שמגבירים רעידות ומשחררים את היישור עם הזמן.

סימני יסוד או תושבת בעייתיים

- **סדקים ביציקה** או יציקה שהתפוררה סביב הברגים.
- **רגל רכה חוזרת** אחרי כל יישור, סימן לתושבת מעוותת.
- **ברגי עיגון רופפים** שצריך להדק שוב ושוב.
- **רעידות שגוברות עם השנים** בלי שינוי בהידראוליקה, חשד לחללים מתחת לתושבת.

אז מה? ההידראוליקה קובעת אם המשאבה תעבוד. השלד קובע אם היא תשרוד. ציר חזק, מסבים משומנים נכון בלי עודף גריז, מצמד מיושר בלייזר על תושבת קשיחה ויסוד פי שלושה עד חמישה מהמשקל, כל אלה אינם "פרטים". הם הסיבה שמשאבה אחת רצה עשור ושכנתה נשרפת כל שנה. רוב התקלות שנראות כתקלת מסב או אטם הן באמת תקלת יישור, סיכה או יסוד. תקנו את השורש, לא את הסימפטום, ופרק 23 ילמד איך לזהות אותו מבעוד מועד.

קישורים בספר

מהירות קריטית ודינמיקה רוטורית של הציר בהרחבה בפרק 8. עומסים רדיאליים שגדלים הרחק מנקודת העבודה המיטבית בפרק 8, וטווח העבודה המומלץ בפרק 12. אטמים מכניים ואיטום הציר בפרק 7. אבחון אי-יישור, רפיון מכני וכשל מסבים דרך ניתוח רעידות בפרק 23.

7 אטימת ציר

Shaft Sealing

בקצרה

הציר חייב לצאת מגוף המשאבה הלחץ אל האוויר, ובדיוק שם, בנקודת המעבר, צריך למנוע מהנוזל לברוח. זו משימת **אטם הציר**, והוא הרכיב המתכלה שמתקלקל ראשון בכל משאבה. שתי משפחות מובילות: **אטם מכני** (mechanical seal) ו**אטם חבל** (gland packing), ויש גם משאבות **ללא אטם** שמבטלות את נקודת הדליפה כליל.

הפרק הזה מסביר איך כל שיטה עובדת, מתי לבחור בה, ומהי טעות האחזקה היחידה שהורסת אטם מכני בשניות. **כלל מפתח: דליפה מאטם חבל היא מצב תקין; דליפה מאטם מכני היא כשל. אותה תופעה, שתי משמעויות הפוכות.**

למה בכלל צריך אטם

כל מקום שבו ציר מסתובב חוצה דופן לחוצה הוא נקודת בריחה אפשרית. האטם הוא שומר הסף, והוא גם החוליה החלשה ביותר בשרשרת.

הנוזל בתוך גוף המשאבה נמצא בלחץ, לעיתים עשרות מטרים של עמוד מים. הציר חייב לעבור דרך הדופן כדי להתחבר למנוע. בלי שום אטימה, הנוזל היה זורם החוצה לאורך הציר בכל סיבוב. האתגר ההנדסי עדין: צריך לאטום מעבר בין משטח **מסתובב** למשטח **נייח**, מבלי ליצור חיכוך וחום שישרפו את האטם עצמו. הציר מסתובב ב-1450 או 2900 rpm, ובהיקפו מהירות המגע יכולה להגיע ל-10–25 m/s. כל אטם הוא איזון בין שני רעים: אטימה הדוקה מדי שורפת, אטימה רפויה מדי דולפת.

שלוש המשפחות פותרות את אותה בעיה בשלוש פילוסופיות שונות. אטימה חבלית מקבלת דליפה קטנה ומבוקרת כמחיר הכרחי לקירור. אטם מכני שואף לדליפה אפסית דרך קרום נוזל מיקרוני. וגישת חוסר-האטם פשוט מבטלת את הציר החוצה. נכיר את שלושתן לפי הסדר.

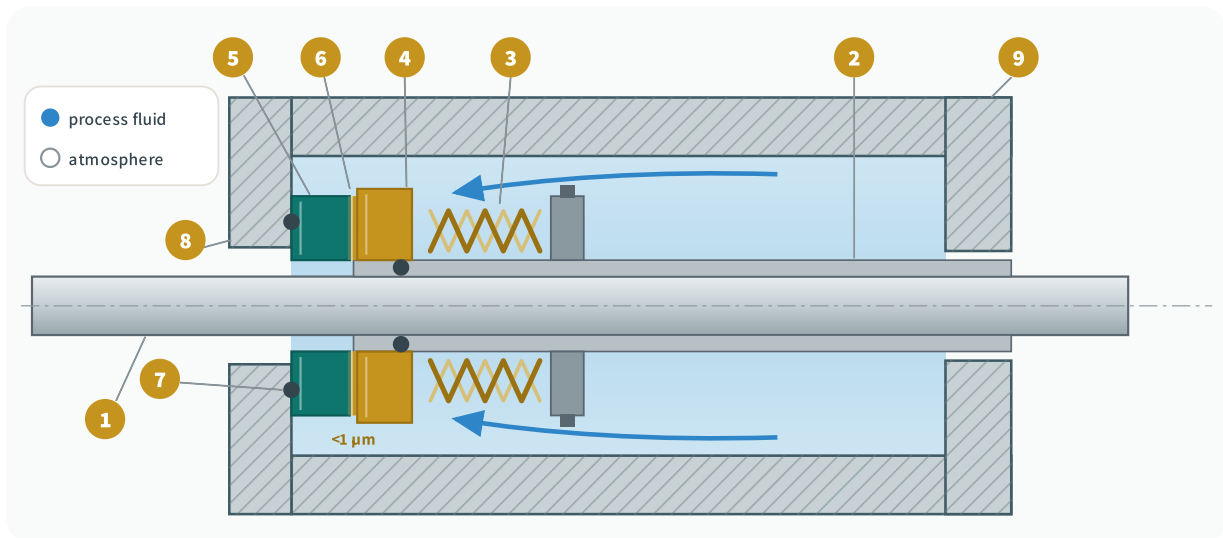
אטם מכני: העיקרון

באטם מכני (mechanical seal) שני משטחים שטוחים ומלוטשים להפליא נלחצים זה אל זה. אחד מהם, **הטבעת המסתובבת** (primary ring), מסתובב יחד עם הציר. השני, **הטבעת הנגדית** (mating ring), נייח ומעוגן בגוף המשאבה. המשטחים מעובדים לשטיחות של פחות מאורך גל אחד של אור, ולכן הם נצמדים כמעט מושלם.

בין שני המשטחים אין מגע מתכת אל מתכת ממש. נוזל העבודה זוחל פנימה ויוצר **קרום נוזל** בעובי מיקרוני, פחות מ- $1 \mu\text{m}$. הקרום הזה הוא הגאונות של האטם: הוא **משמן** את המשטחים כדי שלא ייכרסמו, **מקרר** אותם מחום החיכוך, ובו זמנית **אטם**, כי הוא דק כל כך שהזרימה

דרכו זניחה. הדליפה האמיתית של אטם מכני בריא היא כמה טיפות ביום, לרוב מתאדות עוד לפני שרואים אותן.

קפיץ (spring) או מערך קפיצים דוחף בעדינות את המשטחים זה אל זה ומפצה על שני דברים: על השחיקה האיטית של המשטחים לאורך השנים, ועל תנודות ציר קטנות. כך המגע נשמר רציף גם כשהמשטחים מתבלים בעשירות המילימטר. **השרוול (sleeve)**, הנקרא גם תותב, מגן על הציר עצמו מבלאי ומאפשר להחליף אטם בלי לגעת בציר היקר.



1 shaft · 2 shaft sleeve · 3 spring · 4 rotating face (primary ring) · 5 stationary face (mating ring)
6 fluid film $<1 \mu\text{m}$ · 7 O-ring secondary seals · 8 gland plate · 9 seal chamber (casing)

איור 7.1 · חתך אטם מכני, בקידוד צבע: כחול = צד הנוזל בלחץ, לבן = צד האטמוספירה. הקפיץ (סליל זהב) דוחף את הטבעת המסתובבת (זהב) שעל השרוול אל הטבעת הנגדית הנייחת (טורקיז) שבלוח האטם. במפגש המשטחים המלוטשים נוצר קרום נוזל דק ממיקרון (הקו הזהוב הזוהר) שמשמן, מקרר ואוטם בו זמנית. טבעות O-משניות (שחור) חוסמות את נתיבי הדליפה אל הציר ואל הגוף.

סכמטי · המגע בין המשטחים הוא לב האטם

טבעת מסתובבת · primary ring

המשטח שנע עם הציר, לרוב מקרביד צורן (silicon carbide) או פחמן. נישא על השרוול ונלחץ קדימה בקפיץ.

טבעת נגדית · mating ring / seat

המשטח הנייח המעוגן בגוף או בלוח האטם. חומר קשיח ועמיד בשחיקה, לרוב קרביד צורן או קרביד טונגסטן.

אטמים משניים · secondary seals (O-rings)

טבעות O-גמישות שאוטמות בין הרכיבים הנייחים לציר ולגוף. הן אינן נוגעות בחיכוך הסיבובי, רק חוסמות נתיבי דליפה משניים.

סוגי אטמים מכניים

אותו עיקרון יושב בתוך כמה תצורות, לפי מסוכנות הנוזל ונוחות ההתקנה. ככל שהנוזל מסוכן יותר, מוסיפים שכבת הגנה.

1

אטם בודד (single)

זוג משטחים אחד. הפתרון הסטנדרטי לנוזלים נקיים ולא מסוכנים, רוב משאבות המים. זול, פשוט, אמין.

2

אטם טנדם (tandem)

שני אטמים בודדים בטור, שניהם פונים לאותו כיוון, עם נוזל חוצץ בלחץ נמוך ביניהם. האטם השני הוא גיבוי אם הראשון כושל. נפוץ לנוזלים נדיפים.

3

אטם כפול (double / back-to-back)

שני אטמים גב אל גב עם נוזל חוצץ בלחץ

גבוה

מלחץ הנוזל. כך גם אם אטם כושל, הנוזל המסוכן לא יוצא, רק הנוזל החוצץ הנקי נכנס. ליישומים רעילים וקריטיים.

4

אטם מחסנית (cartridge)

כל רכיבי האטם מורכבים מראש על שרוול כיחידה אחת מכוילת במפעל. מתקינים ומסירים אזיק אבטחה אחד. מונע טעויות הרכבה ומקצר השבתה. כיום ברירת המחדל המקצועית.

למה אטם מכני מנצח

- דליפה מזערית עד אפסית, ניקיון סביבתי
- לא צורך מים לשיטיפה ברוב היישומים
- אורך חיים ארוך כשמותקן נכון
- לא דורש כוונון תקופתי, "התקן ושכח"

החיסרון והסכנה

- ריצה יבשה שורפת אותו בשניות
- יקר יותר מאטם חבל לרכישה ולהחלפה
- החלפה דורשת פירוק והרמת ציר
- רגיש למוצקים ולנוזל אברסיבי

תוכניות שטיפה לפי API 682

אטם מכני בריא חי על נוזל נקי וקריר במגע עם המשטחים. תקן API 682 (התקן המוביל לאטמי משאבות בתעשייה) מגדיר משפחה של **תוכניות שטיפה** (*flush plans / piping plans*) ממוספרות, שכל אחת מנתבת נוזל אל תא האטם בדרך אחרת. הבחירה תלויה בנוזל: נקי או מלוכלך, קר או חם, רגיל או מסוכן. אלה התוכניות הנפוצות שכדאי להכיר.

תוכנית	מה היא עושה	מתי משתמשים
Plan 11	מנתבת נוזל מהסניקה (discharge) דרך מצערת אל תא האטם, מקררת ושוטפת את המשטחים. התוכנית הבסיסית והנפוצה ביותר.	נוזל נקי, ברירת מחדל לאטם בודד
Plan 21	כמו 11, אך הנוזל עובר דרך מצנן (cooler) לפני שהוא מגיע לאטם. מוריד טמפרטורה.	נוזל חם, להגן על המשטחים מחום
Plan 23	ממחזרת נוזל בלולאה סגורה דרך מצנן עם מאיץ-עזר. יעילה אנרגטית לקירור, כי אינה לוקחת נוזל חם מהסניקה.	מים חמים, יישום הקירור המומלץ
Plan 52	מאגר נוזל חוצץ לא לחץ (unpressurized) לאטם כפול/טנדם. קולט דליפה ומתריע על כשל האטם הראשי.	אטם טנדם, נוזל נדיף לא רעיל
Plan 53 / 54	מאגר נוזל חוצץ בלחץ (pressurized) לאטם כפול. הנוזל הנקי תמיד בלחץ גבוה מהתהליך, כך שדליפה החוצה לעולם אינה אפשרית. 53 מאגר בלחץ (חנקן), 54 סחרור חיצוני בלחץ.	נוזל רעיל/מסוכן, אפס פליטה

איך לזכור את ההיגיון

המספרים הנמוכים (11, 21, 23) מטפלים באטם **בודד** ועוסקים בעיקר בקירור ובשטיפה. המספרים הגבוהים (52, 53, 54) מטפלים באטם **כפול/טנדם** ועוסקים בנוזל חוצץ ובמניעת פליטה. ככל שהנוזל מסוכן יותר, עולים במספר התוכנית. ברוב משאבות המים בישראל, אטם בודד עם Plan 11 מספיק בהחלט.

ריצה יבשה הורסת אטם מכני בשניות

- קרום הנוזל בעובי המיקרוני הוא גם המשמן וגם המקרר של המשטחים. ברגע שהמשאבה רצה **בלי נוזל**, ולו לכמה שניות, הקרום נעלם. שני המשטחים מתחככים זה בזה ביובש במהירות היקפית של עשרות מטרים בשנייה, מתחממים בפיצוץ, מתפצחים מהלם תרמי, והאטם נהרס.
- **הסיבה השכיחה:** הפעלת משאבה לפני מילוי (priming), מאגר שהתרוקן, או ברז יניקה סגור.
 - **הזמן:** נזק תוך 30–5 שניות. אין "אזהרה מקדימה" שמספיקה לכבות בזמן.
 - **המניעה:** מתג מפלס/זרימה שמכבה את המשאבה לפני שהיא מתייבשת, ונוהל הפעלה שמוודא מילוי. לעולם אל תפעיל "רק לרגע לבדוק".
- זו הטעות מספר אחת ששורפת אטמים בשטח. מנהל אחזקה שמבין רק את המשפט הזה כבר חסך לעצמו החלפת אטם.

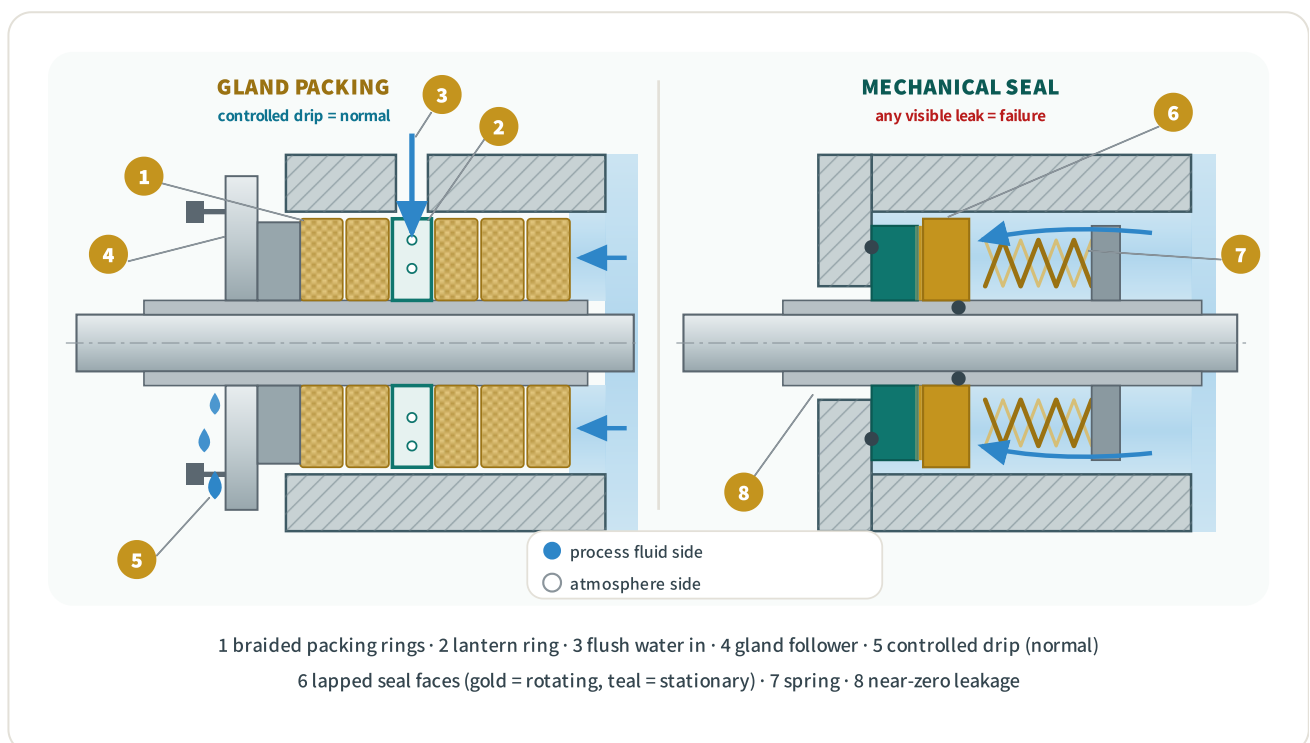
אטם חבל

האטם חבל (gland packing) הוא השיטה הוותיקה, ועדיין מצוינת במקומה. טבעות **חבל אטימה קלוע** (braided packing) נחתכות לאורך, מולפפות סביב הציר ונדחסות בתוך תא הנקרא **תיבת אטם** (stuffing box). **אום הידוק** (gland nut / follower) לוחץ את הטבעות עד שהן

אוטמות סביב הציר. החבל עשוי סיבים סינתטיים, גרפיט או PTFE, לעיתים עם שמן או חומר סיכה ספוג בתוכם.

בניגוד מהותי לאטם מכני, אטימה חבלית **אמורה** לטפטף מעט. הטפטוף הזה אינו תקלה אלא תכונה: זרם דק של נוזל זוחל בין החבל לציר, מסכך אותם ומפנה את חום החיכוך. אטימה חבלית שיובשה לחלוטין תתחמם, תקשה ותשרוף את הציר. לכן מכווננים אותה לקצב טפטוף איטי וקבוע, עשרות בודדות של טיפות בדקה (ראו כלל האצבע בהמשך), ולא לאיטום מוחלט.

בין טבעות החבל מציבים לעיתים **טבעת פנס** (lantern ring), טבעת חלולה ומחורצת שמולה נכנס נוזל אטימה מבחוץ. הנוזל הזה, לרוב מים נקיים בלחץ, מבטיח סינון וקירור גם כשהנוזל המוזרם מלוכלך או אברסיבי, ומונע מחלקיקים לחדור פנימה אל הציר.



איור 7.2 · שתי השיטות זו מול זו, באותו קידוד צבע (כחול = נוזל בלחץ). משמאל אטם חבל: חמש טבעות חבל קלוע (זהב במרקם אריג) נדחסות בעזרת אום ההידוק, טבעת פנס (טורקיז) מקבלת מי שטיפה מבחוץ, וטפטוף מבוקר יוצא בצד האטמוספירה, ושם הוא תקין. מימין אטם מכני: קפיץ לוחץ זוג משטחים מלוטשים (זהב מסתובב, טורקיז נייח) סביב קרום נוזל זוהר, עם דליפה כמעט אפסית, ושם כל טפטוף הוא תקלה.

סכמטי · להמחשת ההבדל המבני

כלל אצבע לכוונון אטם חבל

אטימה חבלית שלא מטפטפת כלל היא אטימה חבלית **מהודקת מדי**, שתשחק את הציר ותתחמם עד עשן. אטימה חבלית שמזרימה סילון היא **רפויה מדי**. הכונון הנכון הוא טפטוף איטי וקבוע, סדר גודל של 30–60 טיפות בדקה במשאבה גדולה. הדק את אום ההידוק רבע סיבוב בכל פעם, תן לרוץ כמה דקות, ובדוק את הטמפרטורה ביד. תא חם מדי למגע = יותר מדי הידוק.

לאטימה חבלית חיסרון מובנה: היא **שוחקת את השרוול**. החבל הנדחס נמצא במגע מתמיד עם הציר המסתובב, וגם הקלוע הרך מבלה לאט את המתכת. לכן משאבות אטם חבל מותקנות כמעט תמיד עם שרוול ציר נשלף ובר-החלפה. בנוסף, הדליפה הגלויה מרטיבה את הבסיס, וזה

לא מקובל בנוזל מסוכן או בסביבה נקייה. כנגד זאת, אטימה חבלית זולה, סלחנית לטעויות, עמידה בנוזל מלא חול, וקלה להחלפה בשטח בלי פירוק עמוק. למשאבות ביוב, מי גלם ומים עכורים היא עדיין בחירה מצוינת.

משאבות ללא אטם

כשאסור בשום אופן שהנוזל יברח, מפני שהוא רעיל, חומצי, נדיף או יקר מאוד, מוותרים על אטם הציר לחלוטין. אם אין ציר שחוצה את הדופן, אין נקודת דליפה. שתי טכנולוגיות מגשימות זאת.

צימוד מגנטי (magnetic drive)

במשאבת **מגנט-דרייב** (*mag-drive*) המנוע אינו מחובר ישירות למאיץ. במקום זה, על ציר המנוע יושב מערך מגנטים חיצוני, ועל ציר המאיץ מערך מגנטים פנימי. ביניהם עוברת **דופן אטומה** (*containment shell*) שאינה מנוקבת כלל. המגנטים מושכים זה את זה דרך הדופן, וכך המנוע מסובב את המאיץ בלי שום ציר חוצה. הנוזל כלוא לחלוטין מאחורי הדופן.

מנוע אטום (canned motor)

במנוע אטום (*canned motor pump*) הולכים צעד רחוק יותר: המנוע והמשאבה בנויים כיחידה אחת אטומה, והרוטור של המנוע טבול בנוזל המוזרם עצמו, שמסכך ומקרר אותו. "פחית" (*can*) דקה מפלדת אל-חלד עוטפת את הרוטור ומפרידה אותו מהליפופים החשמליים. גם כאן, אין ציר שיוצא החוצה ואין נקודת אטימה לתחזק.

מחיר חוסר-האטם

- יקר משמעותית בקנייה
- ריצה יבשה הורסת בשניות (אין סיכון)
- רגיש למוצקים, דורש נוזל נקי
- פירוק לתיקון מורכב יותר

יתרון חוסר-האטם

- אפס דליפה לסביבה, ממש אפס
- אין אטם להחליף, אין מי שטיפה
- אידיאלי לחומצות, ממסים, נוזל רעיל
- שקט יחסית, פחות רכיבים נעים חשופים

איך בוחרים: אטם חבל, מכני או ללא אטם

הבחירה אינה "מה הכי טוב" אלא "מה מתאים לנוזל ולתקציב". שלושה שיקולים מובילים: **מסוכנות הנוזל, ניקיון הנוזל ועלות מול דליפה מותרת.** הטבלה מסכמת.

טבלה 7.2 • השוואת שיטות אטימה

קריטריון	אטם חבל	אטם מכני	ללא אטם
דליפה	טפטוף מבוקר (גלוי)	מזערית עד אפסית	0
עלות יחסית	\$	\$	\$\$\$\$
אחזקה	כוונון תקופתי	החלפה בכשל בלבד	נמוכה, פירוק מורכב
מתאים לנוזל	מים, ביוב, מי גלם, אברסיבי	נוזלים נקיים, רוב היישומים	חומצות, ממסים, רעיל, יקר
סובלנות לריצה יבשה	בינונית (שורף ציר)	אפס	אפס
שוחק את השרוול	כן, באופן מובנה	לא	לא

החלטה מהירה בשטח

נוזל פשוט וזול לתחזק, מים או ביוב, ותקציב נמוך → **אטם חבל**. נוזל נקי ורוצים "התקן ושכח"
 בלי דליפה גלויה → **אטם מכני בודד**. נוזל מסוכן/רעיל/נדיף, או דרישה רגולטורית לאפס
 פליטה → **אטם כפול** עם Plan 53/54, או משאבת **ללא אטם**. בכל המקרים, מתג מגן מפני
 ריצה יבשה הוא חובה.

משאבת מי גלם בתחנת שאיבה רצה עם אטם חבל. הטפטוף המבוקר נמדד ב-40 טיפות לדקה. נחשב כמה מים מבוזבזים בשנה, וכמה זה עולה, כדי להעריך אם מעבר לאטם מכני משתלם.

$$\text{run time} = 6000 \text{ h/yr} \quad 1 \text{ drop} \approx 0.05 \text{ mL} \quad \text{drip rate} = 40 \text{ drops/min}$$

$$\text{water tariff} = 9.87 \text{ ₪/m}^3 \text{ (ללא מע"מ)}$$

1 נפח לדקה: $40 \times 0.05 = 2.0 \text{ mL/min} = 0.12 \text{ L/h}$

2 נפח שנתי: $0.12 \text{ L/h} \times 6000 \text{ h} = 720 \text{ L} = 0.72 \text{ m}^3/\text{yr}$

3 עלות המים שאבדו: $0.72 \times 9.87 = 7.1 \text{ ₪/yr}$

תוצאה: $\approx 0.72 \text{ m}^3/\text{yr}$ ועלות זניחה של כ-7 ₪. הטפטוף עצמו אינו הוצאה. ההצדקה הכלכלית למעבר לאטם מכני אינה המים הדולפים, אלא שחיקת הציור/השרוול והאחזקה התקופתית של כוונן אטם החבל.

הלקח: כשמחליטים בין אטם חבל לאטם מכני, אל תתמקדו בנפח הדליפה, הוא קטן. השוו את עלות האחזקה לאורך השנים ואת הסיכון מהשבתה מול פער הרכישה. במשאבה קריטית שרצה ברציפות, אטם מכני משתלם תוך שנים בודדות גם בלי לספור טיפות.

תחזוקה ואבחון כשל אטם

אטם הציור הוא הרכיב המתכלה שמתקלקל ראשון, ולכן אבחון מהיר חוסך השבתה. כמה דגלים שכדאי להכיר.

1 דליפה פתאומית מאטם מכני

קרום הנוזל נפגע, לרוב מריצה יבשה, מהלם תרמי או ממוצקים בנוזל. החלפה, ובדיקת הסיבה כדי שלא יחזור.

2 אטימה חבלית שהפסיקה לטפטף

הודקה מדי או התקשתה. תא חם מדי למגע ביד. שחרר מעט, ואם לא עוזר, החלף את טבעות החבל.

3 ציר חרוט או מחורץ מתחת לאטם החבל

סימן לשחיקת השרוול. החלף את השרוול יחד עם החבל, אחרת האטימה החבלית החדשה תידלף מיד.

רעידות מוגברות עם דליפה

4

תנודת ציר עודפת פותחת את המשטחים. בדוק יישור, מסבים ודחף ציר. ראו פרק 8 (דחף) ופרק 23 (ניטור רעידות).

קישורים בספר

הציר, שרוול הציר והמסבים שעליהם יושב האטם מתוארים בפרק 6 (צירים, מסבים ומצמידים). דחף הציר הצירי והרדיאלי שמשפיע על יציבות המשטחים מטופל בפרק 8. אבחון כשל אטם דרך חתימת רעידות בפרק 23 (ניטור מצב ורעידות). בחירת תצורת האטם כשלב בבחירת המשאבה בפרק 16.

אז מה? האטם הוא הרכיב שמגדיר אם המשאבה דולפת, והוא הראשון שמתקלקל. אטם חבל לנוזל פשוט, אברסיבי ותקציב נמוך, עם טפטוף שהוא תקין ולא תקלה. אטם מכני לרוב היישומים הנקיים, "התקן ושכח", אבל לעולם לא לתת לו לרוץ יבש. אטם כפול או משאבת ללא-אטם לנוזל מסוכן שאסור לו לברוח. כשמשאבה מתחילה לדלוף, האבחנה הראשונה היא תמיד אותה שאלה: איזה אטם מותקן, ומה מצופה ממנו לעשות.

8 דחף צירי ורדיאלי ואיזון

Axial & Radial Thrust & Balancing

בקצרה

בתוך כל משאבה פועלים שני כוחות שמנסים להזיז את הרוטור. **דחף צירי** דוחף את הציר לאורכו, לכיוון היניקה, כי הלחץ על שני צידי המאיץ אינו שווה. **דחף רדיאלי** דוחף את הציר הצידה, כי הלחץ סביב המאיץ בגוף הלשון אינו אחיד, והוא גובר במיוחד הרחק מנקודת העבודה המיטבית.

אם לא מאזנים את הכוחות האלה, הם שורפים מסבים, מכופפים את הציר ומשמידים את אטם הציר. הפרק עוסק במקור הכוחות, בגודלם ובדרכי האיזון שלהם: חורי איזון, תוף איזון, דיסק איזון, מאיצים מגובים, ובסוף, המסב כרשת ביטחון אחרונה.

הכוח שדוחף לאורך: דחף צירי

דמיינו את המאיץ כמטבע עבה שמסתובב בתוך גוף המשאבה. על הפנים האחת לוחץ הנוזל בלחץ גבוה, על הפנים השנייה לחץ נמוך יותר. ההפרש לא מתבטל מעצמו, הוא הופך לכוח שדוחף את כל הרוטור לכיוון אחד.

במאיץ סגור רגיל, צד היניקה (העין) פתוח ללחץ הנמוך של כניסת המשאבה, ואילו על גב המאיץ, **הדופן האחורית** (*back shroud*), פועל הלחץ הגבוה ששורר בחלל שבין המאיץ לגוף. שתי הדפנות כמעט זהות בשטחן, אבל בצד היניקה יש "חור" בשטח, הוא עין היניקה שדרכה נכנס הנוזל בלחץ נמוך. השטח הלא מאוזן הזה, בגודל עין היניקה בערך, הוא מקור הדחף הצירי. הכוח **תמיד פונה לכיוון היניקה**, כי שם הלחץ נמוך יותר.

דחף צירי (F_{ax} axial thrust)

כוח לאורך ציר המשאבה, הנובע מהפרש הלחץ בין דופן הגב לדופן צד היניקה של המאיץ. פונה לכיוון היניקה. נמדד בניוטונים [N].

דחף רדיאלי (F_r radial thrust)

כוח ניצב לציר, הנובע מחלוקת לחץ לא אחידה סביב המאיץ. פונה הצידה ומכופף את הציר. כמעט אפס בנקודת BEP, גדל מאוד מחוצה לה.

כמה גדול הדחף הצירי

אין צורך בנוסחה מדויקת כדי להבין את הגודל, מספיק לדעת ממה הוא נגזר. הדחף הצירי שווה בקירוב ללחץ ההפרש שמייצרת המשאבה, כפול השטח הלא מאוזן בעין היניקה. שתי תובנות מעשיות נובעות מכך מיד: ככל שהמשאבה מייצרת **עומד גבוה יותר**, הדחף גדל, וככל שעין היניקה **גדולה יותר**, הדחף גדל.

$$F_{ax} \approx k \cdot \rho \cdot g \cdot H \cdot (\pi/4) \cdot (D_w^2 - D_s^2)$$

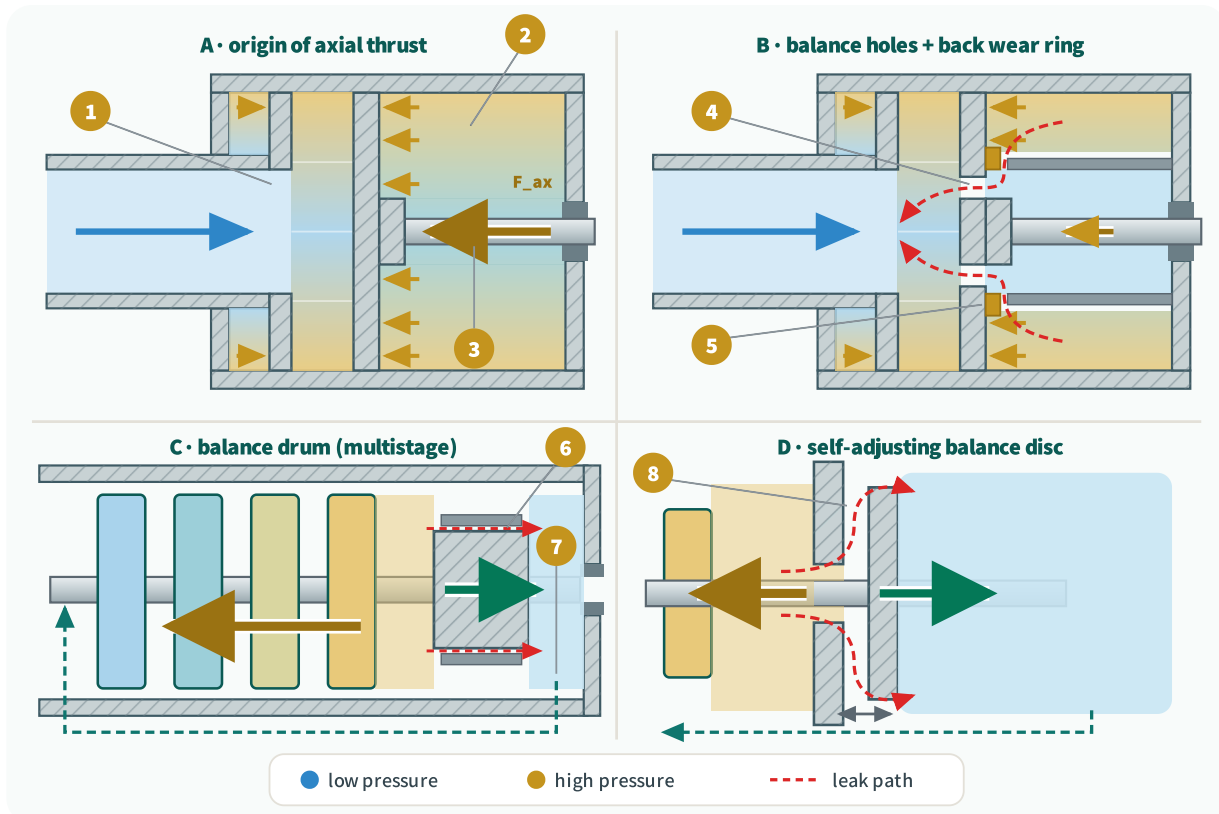
$\rho \cdot g \cdot H$	לחץ ההפרש שמייצרת המשאבה [Pa]. גדל עם העומד, ולכן הדחף הגדול ביותר הוא בעומד הסגירה (shut-off).
D_w	קוטר טבעת השחיקה הקדמית (גבול עין היניקה). D_s קוטר הציר או הטבור. ההפרש בריבועים הוא השטח הלא מאוזן.
k	מקדם תיקון 0.6–0.8, מתחשב בכך שהלחץ בחלל הגב אינו אחיד אלא יורד לכיוון המרכז בגלל סחרור הנוזל.
$\approx$	זהו קירוב הנדסי להבנת הגדלים, לא ערך לתכנון מסב. ליצרן יש מקדמים מדודים למאיץ הספציפי.

למה דווקא לכיוון היניקה

מתחילים מלחץ גבוה זהה משני צידי המאיץ בהיקפו. בצד היניקה, מקוטר עין היניקה ופנימה, הלחץ צונח אל לחץ הכניסה הנמוך. בצד הגב, אותו אזור עדיין חשוף ללחץ הגבוה. לכן נשאר עודף כוח בצד הגב שדוחף את המאיץ **קדימה אל היניקה**. במשאבת בור אנכית זה דוחף את כל טור המאיצים כלפי מטה, ובמשאבה רב-שלבית הכוחות מצטברים שלב אחרי שלב, עד לכוחות עצומים.

איך מאזנים את הדחף הצירי

בלי איזון, הדחף הצירי היה מועך את המסב הצירי בתוך שעות. ארבע משפחות פתרונות, מהפשוט ליקר, מנטרלות אותו. נראה תחילה את התמונה הכוללת, ואז נצלול לכל שיטה.



1 suction eye (low pressure) · 2 high pressure on back shroud · 3 net axial thrust toward suction
4 balance holes · 5 back wear ring · 6 balance drum · 7 balance chamber to suction · 8 balance disc & axial gap

איור 8.1: מקור הדחף הצירי ושלוש שיטות איזון, בחתך. קידוד צבע: כחול = לחץ נמוך, זהוב = לחץ גבוה, אדום מקווקו = נתיב דליפה. (A) הלחץ הגבוה על הדופן האחורית מול עין היניקה הפתוחה ללחץ נמוך יוצר כוח נטו לכיוון היניקה. (B) טבעת שחיקה אחורית וחורי איזון מנקזים את חלל הגב הפנימי אל היניקה ומשווים את הלחץ. (C) במשאבה רב-שלבית הלחץ נבנה שלב אחר שלב ותוף איזון מייצר כוח נגדי (חץ ירוק). (D) דיסק איזון שמווסת את עצמו: כשהדחף גובר המרווח הצירי נסגר, הלחץ על פני הדיסק בצד הלחץ נבנה ודוחף את הרוטור בחזרה.

סכמטי · לפי עקרונות KSB / Hydraulic Institute

ארבע משפחות הפתרונות

1 חורי איזון + טבעת שחיקה אחורית (balance holes)

מוסיפים טבעת שחיקה גם בצד הגב, וקודחים חורים דרך הדופן האחורית. הנוזל הכלוא בחלל הגב זורם דרך החורים חזרה אל היניקה, והלחץ על הגב צונח אל לחץ היניקה. הזול והנפוץ ביותר במשאבות חד-שלביות, אבל גובה מחיר קטן בנצילות נפחית (פרק 4).

2 מאיץ דו-יניקתי או סידור מנוגד (double-suction / opposed)

הפתרון האלגנטי. מאיץ דו-יניקתי שואב משני הצדדים בסימטריה, ולכן הדחף הצירי

מתבטל מעצמו

. במשאבות רב-שלביות אפשר לסדר חצי מהמאיצים פונים לכיוון אחד וחצי לשני (back-to-back) כך שהדחפים מקזזים זה את זה.

3

תוף איזון (balance drum)

גליל מסתובב בקוטר מחושב בקצה טור המאיצים. לחץ הסניקה הגבוה פועל על שטח התוף ויוצר כוח נגדי קבוע, שמקזז את רוב הדחף המצטבר. נפוץ במשאבות רב-שלביות גדולות. מאזן את

חב

הכוח, והשארת נשאר למסב.

4

דיסק איזון (balance disc)

דיסק על הציר עם מרווח צירי משתנה. אם הדחף גובר, הדיסק נדחף, המרווח נסגר, הלחץ בצד הלחוף של הדיסק עולה ודוחף בחזרה. מערכת

שמוסתת את עצמה

ומאזנת כמעט לחלוטין, אך רגישה לבלאי ולנקודות עבודה קיצוניות.

טבלה 8.1 • שיטות איזון דחף צירי, מתי משתמשים בכל אחת (כלי התמצאות)

שיטה	טיפוסי ל-	רמת איזון	חיסרון עיקרי
חורי איזון + טבעת אחורית	חד-שלבי קטן-בינוני	חלקי	איבוד נפחי, בלאי טבעת
מאיץ דו-יניקתי	ספיקה גבוהה, חד-שלבי	מלא (סימטרי)	גוף מורכב ויקר יותר
תוף איזון	רב-שלבי גדול	רוב הכוח	איבוד נזילה (נפחי), שארית למסב
דיסק איזון	רב-שלבי, עומד גבוה	כמעט מלא	רגיש לבלאי ולעבודה מחוץ לטווח
מסב צירי (גב-אל-גב)	גיבוי לכל השיטות	קולט שארית	אורך חיים מוגבל אם עמוס

המסב הוא תמיד רשת הביטחון האחרונה

אף שיטת איזון אינה מושלמת לאורך כל עקום העבודה. גם אחרי תוף או דיסק, נשארת **שארית דחף** שמשנתנה עם הספיקה. לכן כל משאבה כוללת **מסב צירי** (מגע זוויתי angular-contact, או מסב כריות נוטות tilting-pad במשאבות גדולות) שתופס את מה שנשאר. אם המשאבה עובדת זמן רב בעומד הסגירה, או אם חורי האיזון נסתמו, השארית גדלה והמסב נשרף. ניטור טמפרטורת המסב הוא הסימן המוקדם, ראו פרק 6 על מסבים ופרק 23 על ניטור רעידות.

הכוח שדוחף הצידה: דחף רדיאלי

בזמן שהדחף הצירי דוחף לאורך הציר, כוח שני דוחף את הציר הצידה ומכופף אותו. מקורו בגוף הלשון, וגודלו תלוי כל כולו בכמה רחוק אתם מנקודת העבודה המיטבית.

גוף **הלשון** (volute), המכונה גם ספירלה, תוכנן כך שבנקודת ה-BEP הלחץ מסביב למאיץ אחיד כמעט לחלוטין, וכל הכוחות הרדיאליים מתקזזים. אבל ברגע שמתרחקים מ-BEP, האחידות הזו נשברת. בספיקה נמוכה (שניקה) הלחץ גבוה יותר בצד אחד, בספיקה גבוהה הוא גבוה בצד הנגדי. התוצאה היא כוח רדיאלי שדוחף את המאיץ והציר הצידה.

$$F_r = K_R \cdot \rho \cdot g \cdot H \cdot D_2 \cdot b_2$$

K_R מקדם הדחף הרדיאלי, תלוי ספיקה: $K_R = K_0 \cdot [1 - (Q/Q_{BEP})^2]$. אפס ב-BEP, מקסימלי בעומד הסגירה.

b_2 קוטר המאיץ החיצוני $\times$ רוחב המוצא. ככל שהמאיץ גדול ורוחב, הדחף גדל.
 K_0 מקדם גוף הלשון בעומד הסגירה, ≈ 0.36 ללשון בודדת, ויורד ל- ≈ 0.05 ללשון כפולה.
 $\rho \cdot g \cdot H$ שוב לחץ ההפרש. עומד גבוה = דחף רדיאלי גבוה, בדיוק כמו בדחף הצירי.

זה מקשר ישירות לטווח העבודה

הביטוי $[1 - (Q/Q_{BEP})^2]$ הוא הלב של פרק 12 על טווח העבודה המומלץ. בספיקה אפס (עומד סגירה) הביטוי שווה 1, והדחף הרדיאלי מקסימלי. ב- $Q = Q_{BEP}$ הוא אפס. לכן הכלל "אל תפעיל משאבה הרחק מ-BEP, ובמיוחד אל תפעיל זמן רב בעומד סגירה" אינו המלצה כללית, אלא נובע ישירות מהפיזיקה הזו: ככל שאתם רחוקים מ-BEP, הדחף הרדיאלי מכופף את הציר חזק יותר, שוחק את האטם ושורף את המסב הרדיאלי.

לשון כפולה, הפתרון הקלאסי

הדרך היעילה ביותר להקטין דחף רדיאלי היא **לשון כפולה** (*double volute*): לשון שנייה מול הראשונה מחלקת את הלחץ לשני ערוצים סימטריים, כך שהכוחות מקזזים זה את זה כמעט לחלוטין. דחף שיורי טיפוסי של לשון כפולה הוא רק **10% עד 20%** מזה של לשון בודדת. באותם תנאים. המחיר: ייצור מורכב יותר וירידה קטנה בנצילות בגלל החיכוך בלשון הנוספת. במשאבות גדולות, התועלת מצדיקה זאת בקלות.

לשון בודדת • החיסרון

- דחף רדיאלי מלא הרחק מ-BEP.
- התכופות ציר גדולה בעומד סגירה.
- בלאי אטם ומסב מואץ.
- מתאימה רק למשאבות קטנות ליד BEP.

לשון כפולה • מתי שווה

- משאבות בעומד גבוה (יותר מ-50 מ' בערך).
- מאיצים גדולים (D_2 ו- b_2 גדולים).
- משאבות שעובדות לעיתים קרובות מחוץ ל-BEP.
- הארכת חיי מסב ואטם משמעותית.

התכופות הציר ומהירות קריטית

הדחף הרדיאלי לא נשאר מספר על הנייר, הוא מכופף את הציר ממש. כמה? כאן נכנס לתמונה אחד היחסים החשובים ביותר בכל תכנון מכני: ההתכופות תלויה בעוצמה **בחזקה שלישית באורך הציר ובחזקה רביעית בקוטרו**.

$$\delta \propto F_r \cdot L^3 / (E \cdot D_{\text{shaft}}^4)$$

δ	שקיעת הציר במרכז המאיץ [mm]. ככל שגדולה יותר, האטם והמסב סובלים יותר.
L^3	אורך הזרוע מהמסב אל המאיץ (ובמשאבת מאיץ תלוי: אורך הזיז), בחזקה שלישית . הכפלת המרחק = פי 8 התכופות. זו הסיבה שמאיץ "תלוי" רחוק מהמסב מסוכן.
D^4	קוטר הציר, בחזקה רביעית . ציר עבה יותר ב-19% מקטין התכופות בחצי. לכן צירים גסים = אמינות.
E	מודול האלסטיות של חומר הציר (פלדה 200 GPa ≈). קבוע למעשה.

המשמעות התכנונית של L^3/D^4

שני המספרים האלה מסבירים למה יצרנים טובים משקיעים בצירים גסים וקצרים ובמסבים קרובים למאיץ. ציר ארוך ודק עשוי להיראות חסכוני, אבל הוא מכופף הרבה יותר, ולכן שוחק את אטם הציר, פותח מרווחים בטבעות השחיקה (יותר איבוד נפחי, פרק 4), ומקרב את המשאבה **לתהודה**. מדד נפוץ לאיכות הוא יחס L^3/D^4 של הציר, "מקדם הגמישות", שיצרנים מפרסמים בקטלוג. נמוך יותר = ציר נוקשה יותר = אמין יותר.

מהירות קריטית ומהירות היקפית

לכל ציר מסתובב יש **מהירות קריטית** (*critical speed*), מהירות הסיבוב שבה התדר העצמי של הציר מתלכד עם תדר הסיבוב, וההתכופות מתפוצצת לתהודה אלימה. מתכננים תמיד שומרים את מהירות העבודה הרחק מהמהירות הקריטית, בדרך כלל מתחת ל-70% ממנה (ציר "נוקשה", rigid shaft) או הרבה מעליה (ציר "גמיש", flexible shaft, נפוץ במשאבות רב-שלביות גדולות שחייבות לעבור דרך התהודה במהירות בעת ההתנעה).

גודל קשור שכדאי להכיר הוא **המהירות ההיקפית** (*tip speed*) של המאיץ, שקובעת את העומד המקסימלי שהמאיץ יכול לייצר.

$$u_2 = \pi \cdot D_2 \cdot n / 60$$

u_2	מהירות קצה המאיץ [m/s]. עומד מקסימלי $H_{\text{max}} \approx u_2^2 / (2g)$, ולכן עומד גבוה דורש מהירות היקפית גבוהה.
D_2	קוטר המאיץ החיצוני [m]. n מהירות הסיבוב [rpm], $\pi/60$ ממיר ביחד עם הקוטר ל-m/s.

דוגמה 8.1 · איך הדחף הרדיאלי מזנק בעומד הסגירה

משאבת לשון בודדת בתחנת שאיבה. נשווה את הדחף הרדיאלי בנקודת העבודה המיטבית מול הפעלה ממושכת בעומד סגירה (ברז סגור), כדי לראות עד כמה זה מסוכן.

$$K_0 = 0.36 \text{ (לשון בודדת)} \quad H_{\text{shutoff}} = 68 \text{ m} \quad H_{\text{BEP}} = 55 \text{ m} \quad b_2 = 0.035 \text{ m} \quad D_2 = 0.40 \text{ m} \\ \rho g = 9810 \text{ N/m}^3$$

1 בנקודת BEP, היחס $Q/Q_{\text{BEP}} = 1$, ולכן: $K_R = 0.36 \cdot [1 - 1^2] = 0$

2 הדחף הרדיאלי ב-BEP כמעט מתאפס (נשארת רק שארית קטנה מאי-דיוקי ייצור):

$$F_r(\text{BEP}) \approx 0 \text{ N}$$

3 בעומד סגירה $Q = 0$, ולכן: $K_R = 0.36 \cdot [1 - 0^2] = 0.36$

4 נציב בנוסחה 8.2 עם H_{shutoff} :

$$F_r = 0.36 \cdot 9810 \cdot 68 \cdot 0.40 \cdot 0.035 = 3,362 \text{ N}$$

תוצאה: דחף רדיאלי קופץ מאפס ב-BEP ל-**3,362 N** בעומד סגירה. זה כוח של כ-343 kgf שמכופף את הציר הצידה, כמשקלם של שלושה-ארבעה אנשים כבדים התלויים על קצה הציר. הפעלה ממושכת כך שוחקת אטם ומסב תוך שבועות.

אז מה? שני כוחות נסתרים מחליטים על אורך חיי המשאבה, ושניהם גדלים עם העומד. הדחף הצירי נדחף לכיוון היניקה ומאוזן בחורי איזון, תוף או דיסק, עם המסב כרשת ביטחון. הדחף הרדיאלי מתאפס ב-BEP ומזנק הרחק ממנו, ולכן לשון כפולה והפעלה קרובה ל-BEP הן לא מותרות אלא הכרח. וכשבוחרים משאבה, ציר גס וקצר עם מסבים קרובים למאיץ, יחס L^3/D^4 נמוך, שווה שנים של עבודה שקטה בלי דליפות ובלי שריפת מסבים. כשמופיעים רעש, חום במסב או דליפה באטם, חזרו לכאן: לרוב מקור הבעיה הוא דחף לא מאוזן או עבודה הרחק מ-BEP.

D⁴

קשיחות
עם קוטר הציר

L³

התכופפות
עם אורך הציר

0

דחף רדיאלי
מתאפס ב-BEP



דחף צירי
לכיוון היניקה

אז מה? שני כוחות נסתרים מחליטים על אורך חיי המשאבה, ושניהם גדלים עם העומד. הדחף הצירי נדחף לכיוון היניקה ומאוזן בחורי איזון, תוף או דיסק, עם המסב כרשת ביטחון. הדחף הרדיאלי מתאפס ב-BEP ומזנק הרחק ממנו, ולכן לשון כפולה והפעלה קרובה ל-BEP הן לא מותרות אלא הכרח. וכשבוחרים משאבה, ציר גס וקצר עם מסבים קרובים למאיץ, יחס L^3/D^4 נמוך, שווה שנים של עבודה שקטה בלי דליפות ובלי שריפת מסבים. כשמופיעים רעש, חום במסב או דליפה באטם, חזרו לכאן: לרוב מקור הבעיה הוא דחף לא מאוזן או עבודה הרחק מ-BEP.

קישורים בספר

המסבים שתופסים את שארית הדחף בפרק 6. אטם הציר שסובל מהתכופפות בפרק 7.
הקשר בין דחף רדיאלי לטווח העבודה המומלץ בפרק 12. אבחון דחף לא מאוזן דרך חתימת
הרעידות בפרק 23. בחירת משאבה עם בדיקת גוף הלשון ומסבים בפרק 16.

9 חומרים, קורוזיה ושחיקה

Materials, Corrosion & Erosion

בקצרה

אותה משאבה בדיוק תחזיק עשרים שנה במים מתוקים ותתפרק תוך שנתיים במים מליחים. ההבדל אינו בהנדסה ההידראולית אלא ב**בחירת החומרים**. הנוזל, המליחות, הכלורידים, הטמפרטורה והחול הם שמכתיבים מאיזו מתכת לבנות כל רכיב רטוב. הפרק עובר על שלושת מנגנוני הבלאי, **קורוזיה**, **שחיקה אברסיבית** ו**שחיקת קוויטציה**, פורש את משפחות החומרים מיצקת ועד סופר-דופלקס, ומסכם הכול במטריצת **בחירת חומרים** מעשית למציאות הישראלית של מים מליחים, קולחים וקידוחים מלאי חול.

שלושה מנגנונים שהורסים משאבה

חומר לא נכשל סתם. הוא נכשל באחת משלוש דרכים מובחנות, ולכל אחת פתרון חומרי שונה. לפני שבחרים מתכת צריך לדעת איזה מנגנון תוקף.

1 קורוזיה (corrosion)

תקיפה כימית-חשמלית של המתכת. מים מליחים, חומציים או עתירי כלוריד "אוכלים" יצקת ופלדה. הפתרון: סגסוגות נירוסטה, דופלקס או ברונזה.

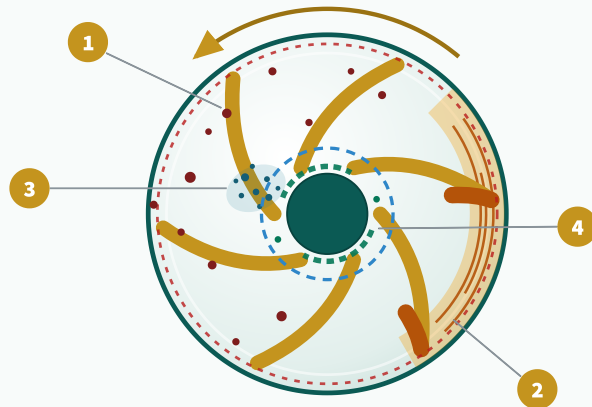
2 שחיקה אברסיבית (abrasive erosion)

חול וחלקיקים מוצקים בנוזל שוחקים את המאיץ ואת הטבעות כמו נייר זכוכית. הפתרון: חומרים קשים, ציפויים והנדסה הידראולית מתאימה.

3 שחיקת קוויטציה (cavitation erosion)

קריסת בועות אדים שמכרסמת מתכת (פרק 14). הפתרון האמיתי הוא תכן NPSH נכון, אך חומר עמיד קונה זמן.

שלושת המנגנונים יכולים לפעול יחד ולהזין זה את זה. שחיקה אברסיבית מסירה את שכבת המגן הפסיבית מעל הנירוסטה, וחושפת אותה לקורוזיה מואצת. זו **קורוזיה-שחיקה (erosion-corrosion)**, השילוב המסוכן שאחראי לרוב הכשלים בקידוחים מליחים עם חול. לכן לא בוחרים חומר נגד גורם אחד אלא נגד הסביבה כולה.



DAMAGE SIGNATURES

- 1 • corrosion**
pitting + uniform thinning of the rim
- 2 • abrasion**
grooves along vane tips, in flow direction
- 3 • cavitation**
spongy local zone, back of vane near eye
- 4 • galvanic**
attack at dissimilar-metal joints

1 corrosion · 2 abrasion · 3 cavitation · 4 galvanic · four colour-coded damage zones on one impeller

איור 9.1: מפת נזק על מאיץ אחד, ארבע חתימות בלאי בקידוד צבע. אדום = קורוזיה: גומות פזורות ודילול אחיד של השוליים (הטבעת המקווקת); ענבר = שחיקה אברסיבית: חריצים בכיוון הזרימה שמעגלים את קצות הלהבים; טורקיז = קוויטציה: אזור ספוגי ממוקד בגב הלהב סמוך לעין; ירוק = קורוזיה גלוונית במפגש מתכות שונות בטבור. זיהוי החתימה בשטח מצביע ישירות על השורש.

סכמטי · להמחשת ההבדל בין מנגנוני הבלאי

משפחות החומרים: מי מתאים לאן

הרכיבים הרטובים, **גוף המשאבה (casing)**, **המאיץ (impeller)**, טבעות השחיקה והציר, נבנים ממשפחה של מתכות שמדורגת לפי שילוב של מחיר, עמידות קורוזיה ועמידות שחיקה. ככל שמטפסים בסולם, המחיר עולה והעמידות איתו. עיקרון הבחירה פשוט: לבחור את החומר **הזול ביותר שיחזיק את אורך החיים הנדרש**, לא פחות ולא יותר.

יצקת ברזל אפורה ויצקת חישולית

יצקת ברזל אפורה (grey cast iron, GG-25 / EN-GJL) היא חומר הבסיס לרוב גופי המשאבות במים מתוקים. זולה, יציבה במידותיה, נוחה ליציקה וקלה לעיבוד. חולשתה היא שבירות וקורוזיה: היא לוקה ב**גרפיטיזציה (graphitisation)**, קורוזיה גרפיטית שבה הברזל מתכלה ומשאר שלד גרפיט רך. **יצקת חישולית (ductile / nodular iron, GGG-40)** חזקה וקשיחה הרבה יותר בזכות גרפיט כדורי, ולכן מועדפת בגופים בלחץ גבוה ובמשאבות גדולות. שתיהן מתאימות למים מתוקים נקיים בלבד.

ברונזה וגאנמטל

ברונזה (bronze / gunmetal), סגסוגת נחושת-בדיל-אבץ, עמידה יפה במים מליחים קלים ובמי ים בזרימה. היא נפוצה במאיצים, בטבעות שחיקה ובמשאבות ימיות קלות. יתרונה: היא אצילה יחסית בסדרה הגלוונית ועמידה היטב במי ים; בזכות רכותה היא משמשת לעיתים קרובות כרכיב בלאי מתחלף (טבעות שחיקה) שמגן על המאיץ היקר. חסרונה: רכה יחסית, נשחקת מהר בנוכחות חול, ולכן אינה מתאימה לקידוחים אברסיביים.

נירוסטה: 304 מול 316

נירוסטה (stainless steel) מתגוננת בעזרת שכבת תחמוצת כרום דקה ופסיבית שמתחדשת מעצמה. AISI 304 (Cr, 8% Ni 18%) טובה למי שתייה ולמים מעט מליחים. AISI 316 מוסיפה כ-2% מוליבדן (Mo), והמוליבדן הוא בדיוק היסוד שמייצב את השכבה הפסיבית מול **כלורידים**. לכן 316 היא ברירת המחדל בקולחים, במים מליחים בינוניים ובסביבה ימית קלה. ההבדל ביניהן מתבטא היטב במדד אחד, ה-PREN, שאליו נגיע מיד.

דופלקס וסופר-דופלקס

כשהמים נעשים אגרסיביים מאוד, מי ים, מי התפלה, קולחים עתירי מלח, אפילו 316 מתחילה לפתח גומות. כאן נכנסת ה**נירוסטה הדופלקסית (duplex stainless)**, מבנה משולב של אוסטיניט ופרייט שמשלב חוזק כפול מ-316 עם עמידות כלורידים גבוהה בהרבה. Duplex 2205 מכסה את רוב היישומים התובעניים, וSuper-Duplex 2507 שמורה למי ים חמים ולמשאבות התפלה בלחץ גבוה. הן יקרות, אך במקום הנכון הן החומר היחיד שיחזיק.

ציפויים וריפודים

לא תמיד צריך לבנות את כל הרכיב מחומר יקר. **ציפוי (coating)** מקומי מגן על מצע זול. ציפויי אפוקסי עשירי-קרמיקה מגנים על גופי יצקת מפני קורוזיה קלה; ציפויי קרביד-טונגסטן או ריסוס תרמי (HVOF) נותנים פני שטח קשים מאוד נגד אברסיה; **ריפוד קשה (hard-facing)** בריתוך סטליט על שולי להבים מאריך מאוד את חיי מאיץ ששוחק בחול. הציפוי זול לעומת חומר מלא, אך נקודת התורפה שלו היא דבקות: סדק או קילוף מקומי מתחילים כשל מהיר, ולכן ציפוי דורש פיקוח איכות הדוק.

טבלה 9.1 • סולם משפחות החומרים (כלי עזר)

חומר	PREN טיפוסי	קורוזיה	שחיקה	עלות יחסית	יישום אופייני
יצקת אפורה GG-25	-	נמוכה	בינונית	1×	מים מתוקים, גוף סטנדרטי
יצקת חישולית GGG-40	-	נמוכה	בינונית-טובה	1.3×	גופים בלחץ גבוה, משאבות גדולות
ברונזה / גאנמטל	-	טובה	בינונית	2×	מים מליחים קלים, מאיצים, טבעות
נירוסטה 304	~19	טובה	טובה	3×	מי שתייה, מים מעט מליחים
נירוסטה 316L	~25	גבוהה	טובה	3.5×	כלורידים, קולחים, ימי קל
דופלקס 2205	~35	גבוהה מאוד	גבוהה	5×	מים מליחים אגרסיביים, ימי
סופר-דופלקס 2507	~42	קיצונית	גבוהה מאוד	8×	מי ים חמים, התפלה לחץ גבוה
פלדה + ריפוד/ציפוי קשה	משתנה	משתנה	קיצונית	משתנה	מים עם חול, בוצה, אברסיה כבדה

קורוזיה: כשהמים תוקפים את המתכת

קורוזיה היא תהליך חשמלי-כימי. במים יש יונים, והמתכת הופכת לתא חשמלי זעיר שבו אזור אחד מתחמצן ומתכלה. הבנת המנגנון מסבירה למה דווקא מים ישראליים מסוימים כה תוקפניים.

קורוזיה גלוונית: המלכודת הנפוצה ביותר

כששתי מתכות שונות נוגעות זו בזו בנוכחות נוזל מוליך, נוצר תא גלווני: המתכת ה"אצילה" פחות (האנודה) מקריבה את עצמה ומתכלה מהר, בעוד המתכת האצילה (הקתודה) מוגנת. שילוב מאיץ ברונזה עם גוף יצקת במים מליחים, או ברגי פלדה רגילה בגוף נירוסטה, יכול לזרז כשל מקומי דרמטי. הכלל: **להתאים את כל הרכיבים הרטובים זה לזה** לאורך הסדרה הגלוונית, ולא לבחור כל רכיב בנפרד. כשנדרשת אנודת הקרבה מכוונת (למשל אבץ), זה צריך להיות תכן מודע, לא תאונה.

קורוזיה גלוונית, איך לא ליפול בה

שלושה כללי אצבע: (1) הימנע ממגע ישיר בין מתכות רחוקות בסדרה הגלוונית; (2) אם חייבים, בודד אותן חשמלית ודאג שהאנודה תהיה גדולה והקתודה קטנה, לעולם לא להפך; (3) חבר אנודת אבץ מתכלה כקורבן מכוון. אטם או בורג קטן מהמתכת הלא נכונה יכול להרוס רכיב יקר סביבו.

קורוזיית גומות וסדקים, ותקיפת כלוריד

שני סוגי הקורוזיה המסוכנים לנירוסטה הם מקומיים, לא אחידים. **קורוזיית גומות** (*pitting*) היא חור זעיר ועמוק שמנקב את המתכת בנקודה אחת, ויונים של כלוריד הם ה"מקדח" שמפרק את השכבה הפסיבית. **קורוזיית סדקים** (*crevice corrosion*) מתרחשת במרווחים סגורים, מתחת לאטם או בתבריג, שבהם החמצן אוזל והכימיה המקומית נעשית חומצית. שני אלה מסוכנים במיוחד כי הם נסתרים: שטח המתכת נראה תקין, ובאמת יש חור חודר שמדמם לחץ.

נוסחה 9.1 · מספר עמידות הגומות PREN

$$PREN = \%Cr + 3.3 \cdot \%Mo + 16 \cdot \%N$$

Cr	אחוז הכרום בסגסוגת. בסיס השכבה הפסיבית. נירוסטה מתחילה בכ-18%.
Mo	אחוז המוליבדן. היסוד שמייצב את השכבה מול כלורידים. ההבדל המרכזי בין 304 ל-316.
N	אחוז החנקן. תורם חזק לעמידות הגומות, בולט בסגסוגות דופלקס.
כלל	ככל ש-PREN גבוה יותר, כך עמידות הגומות בכלורידים גבוהה יותר. למי ים נדרש בדרך כלל $PREN \geq 40$.

קידוח חדש שואב מים מליחים. הניתוח הכימי מראה ריכוז כלוריד גבוה. נחשב את ה-PREN של שני המועמדים ונחליט.

Duplex 2205: Cr = 22%, Mo = 3.1%, N = 0.17% **316L:** Cr = 17%, Mo = 2.1%, N = 0.05%

1 PREN של 316L לפי נוסחה 9.1:

$$\text{PREN} = 17 + 3.3 \cdot 2.1 + 16 \cdot 0.05 = 17 + 6.93 + 0.80 = 24.7$$

2 PREN של דופלקס 2205:

$$\text{PREN} = 22 + 3.3 \cdot 3.1 + 16 \cdot 0.17 = 22 + 10.23 + 2.72 = 34.95 \approx 35.0$$

3 נשווה לסף הנדרש לרמת הכלוריד. למים מליחים חמים נהוג סף בטוח של

$$\text{PREN} \geq 30 \text{ לעבודה רציפה}$$

תוצאה: $316L = 24.7$ מול **דופלקס ≈ 35.0** . ה-316L מתחת לסף הבטוח של 30 עבור הכלוריד הגבוה הזה, והדופלקס מעליו בנוחות. **הבחירה: דופלקס 2205**. עלות ראשונית גבוהה יותר, אך 316L היא מתחיל לפתח גומות תוך שנים ספורות, וניקוב בקידוח עמוק הוא כשל יקר.

זהירות בפרשנות. PREN הוא כלידירוג והשוואה, לא הבטחה. הוא אינו לוקח בחשבון טמפרטורה, קיפאון זרימה, סדקים או איכות הריתוך. שתי סגסוגות עם אותו PREN עלולות להתנהג שונה בשטח. השתמש בו לבחירה ראשונית, ובסביבה קריטית הצלב מול ניסיון שדה וטבלאות יצרן.

ההקשר הישראלי: מים מליחים, קולחים וקידוחים

חלק ניכר ממי הקידוח בישראל, בעיקר באקוויפר החופי ובאזורים מליחים, נושאים ריכוזי כלוריד גבוהים שמכרסמים יצקת ופלדה רגילה. אותו דבר נכון ל**קולחים** בהשקיה ולמי השבה. בקידוחים האלה נירוסטה 316, ובמקרים אגרסיביים **דופלקס**, אינה מותרת אלא תנאי לאורך חיים סביר. תכנון עם יצקת "כי ככה תמיד עשינו" הוא הסיבה הנפוצה ביותר לכשל מוקדם של משאבות בור בישראל. תמיד דרוש ניתוח כימי של המים לפני שמתחייבים על חומר.

הגנה קתודית, בקצרה

במקום, או בנוסף, לחומר יקר אפשר להגן חשמלית. **הגנה קתודית** (*cathodic protection*) הופכת את כל המתכת המוגנת לקתודה: אנודת אבץ או מגנזיום מתכלה (*sacrificial anode*), או זרם חיצוני מבוקר (*impressed current*), מטים את התא הגליוני כך שהקרנן הוא האנודה ולא הציוד. נפוץ בתחנות ימיות ובמשאבות מי ים. זו שכבת הגנה משלימה, לא תחליף לבחירת חומר נכונה.

שחיקה אברסיבית: חול שמנסר את המתכת

חלקיק חול בודד אינו מזיק. מיליוני חלקיקים שעוברים בכל שנייה במהירות גבוהה דרך המאיץ הם נייר זכוכית בלתי-פוסק. זו השחיקה האברסיבית, האויב מספר אחת של משאבות בור בישראל.

קצב הבלאי האברסיבי תלוי בכמה גורמים שעובדים יחד, וההבנה שלהם מסבירה למה אותה משאבה שורדת בקידוח אחד ונהרסת באחר.

1 מהירות, הגורם החזק ביותר

קצב השחיקה גדל בערך כחזקה שלישית של מהירות הנוזל. ירידה קטנה במהירות, למשל הגדלת חתך זרימה או הורדת סל"ד, מורידה את הבלאי דרמטית.

2 ריכוז וגודל החלקיקים

יותר חול, חלקיקים גדולים יותר וקשים יותר (קוורץ חד) שוחקים מהר יותר מסחף עדין ועגול.

3 קשיות פני השטח

ככל שהמתכת קשה יותר מהחלקיק, פחות חומר ניתן בכל מגע. כאן הציפויים הקשים מנצחים.

4 זווית הפגיעה

חומרים רכים נשחקים בפגיעה משיקה (חיתוך); חומרים קשים-שבירים דווקא בפגיעה ניצבת (ניפוף). התכן ההידראולי משפיע על הזווית.

הרכיבים שנפגעים ראשונים הם אלה שהנוזל המהיר ביותר חולף בהם: שולי כניסת הלהבים, **טבעות השחיקה** (*wear rings*) ולשון הגוף. בלאי הטבעות חשוב במיוחד כי הוא קושר ישירות לפרק 4: ככל שטבעת השחיקה נשחקת, המרווח גדל, הנזילה הפנימית מהצד הלחוץ חזרה ליניקה עולה, והאיבוד הנפחי תוקף את הספיקה והנצילות. משאבת חול מאבדת נצילות לא רק כי המאיץ מחוספס, אלא כי הטבעות "נפתחו".

פתרונות לשחיקה אברסיבית, מהזול ליקר

- **הורדת מהירות**, מאיץ גדול יותר בסל"ד נמוך יותר לאותה נקודת עבודה. הזול והאפקטיבי ביותר בזכות חוק החזקה השלישית.
- **חומר קשה לטבעות**, טבעות שחיקה מוחלפות מנירוסטה קשוחה או קרביד, שזולות להחלפה ומגנות על המאיץ.
- **ריפוד וציפוי קשה**, ריסוס קרביד-טונגסטן או ריפוד סטליט על המאיץ והלשון.
- **סגסוגות עמידות**, יצקות עתירות כרום (high-chrome white iron, ~27% Cr) למשאבות בוצה כבדה.
- **הפרדת מוצקים**, מסנן, מפריד חול או שיקוע לפני המשאבה. לטפל במקור.

שחיקת קוויטציה: כשהנוזל עצמו הופך לפטיש

מנגנון הבלאי השלישי שונה באופיו: אין בו חלקיקים זרים. כפי שמפורט בפרק 14, כשהלחץ בכניסה למאיץ צונח אל מתחת ללחץ האדים, נוצרות בועות אדים זעירות, ומילימטרים ספורים במורד הזרם הן קורסות באלימות בגב הלהב. כל קריסה היא פיצוץ מיקרוסקופי שיורק סילון נוזל במהירות אדירה אל פני המתכת, והתוצאה היא בלאי **ספוגי** אופייני שמרוכז באזור קבוע, גב הלהב סמוך לכניסה.

חשוב להבין סדר עדיפויות: **הפתרון לקוויטציה הוא תכן, לא חומר**. אם ה-NPSH הזמין נמוך מהנדרש (פרק 14), שום מתכת בעולם לא תחזיק לנצח, היא רק תתכלה לאט יותר. החומר קונה זמן עד שמתקנים את שורש הבעיה. עם זאת, כשהקוויטציה בלתי-נמנעת (למשל בשולי טווח עבודה רחב), בוחרים חומר עמיד יותר. דירוג גס של עמידות בקוויטציה: יצקת אפורה רגישה ביותר; ברונזה וברונזה-אלומיניום טובות; נירוסטה 316 ודופלקס עמידות מאוד; וסגסוגות קובלט-כרום (סטליט) הן הטובות ביותר. לכן ריפוד סטליט מקומי בגב הלהב הוא פתרון נפוץ לקוויטציה שאי-אפשר לבטל לגמרי.

טבלה 9.2 • עמידות יחסית בקוויטציה לפי חומר (כלי עזר)

חומר	עמידות יחסית בקוויטציה	הערה
יצקת ברזל אפורה	1 (בסיס)	רגישה מאוד, מתפוררת מהר
ברונזה / גאנמטל	~3	טובה במשאבות ימיות
נירוסטה 304	~6	טובה ליישומי מים
נירוסטה 316 / דופלקס	~8	בחירת ברירת מחדל לעמידות
ריפוד סטליט / קובלט-כרום	~15	ריפוד מקומי בגב הלהב

ערכים יחסיים להמחשה, מנוormלים ליצקת אפורה = 1 • מבוסס על דירוגי ספרות הנדסית

איך מבדילים בשטח בין קוויטציה לאברסיה

שתייה משאירות פני שטח מחוספסים, אבל החתימה שונה (איור 9.1). קוויטציה מרוכזת באזור אחד וקבוע, גב הלהב סמוך לעין, ונראית ספוגית ועמוקה מקומית. אברסיה מפושטת ומחורצת בכיוון הזרימה לאורך כל המסלול, ומעגלת את השוליים. החתימה מצביעה על השורש: ספוגי-ממוקד דורש בדיקת NPSH; מחורץ-מפושט דורש בדיקת חול ומהירות.

מטריצת בחירת החומרים

הטבלה הבאה היא ליבת הפרק וכלי העבודה המעשי. היא מצליבה את סוג הנוזל והמליחות מול רמת האברסיה, ומחזירה המלצת חומר לרכיבים הרטובים העיקריים. השתמש בה כנקודת פתיחה אחרי שיש בידך ניתוח כימי של המים ואומדן ריכוז המוצקים. בסביבה קריטית, אשר מול יצרן וניסיון שדה.

טבלה 9.3 • מטריצת בחירת חומרים, נוזל ומליחות מול אברסיה

סוג נוזל / מליחות	אברסיה נמוכה (מים נקיים)	אברסיה בינונית (חול מועט)	אברסיה גבוהה (חול / בוצה)
מים מתוקים $Cl^- < 250 \text{ mg/L}$	יצקת + מאיץ ברונזה	יצקת + טבעות נירוסטה קשה	יצקת עתירת כרום / ציפוי קשה
מליחים קלים $Cl^- 250 \sim 300$	ברונזה / נירוסטה 304	נירוסטה 304 + ריפוד	נירוסטה 316 + ציפוי קשה
מליחים / קולחים $Cl^- \sim 300 \sim 2,000$	נירוסטה 316	נירוסטה 316 + טבעות קשות	דופלקס 2205 + ריפוד
מליחות גבוהה $Cl^- 2,000 \sim 20,000$	דופלקס 2205	דופלקס 2205	דופלקס 2205 + ציפוי קשה
מי ים / התפלה $Cl^- > 20,000$	סופר-דופלקס 2507	סופר-דופלקס 2507	סופר-דופלקס + הגנה קתודית

נקודת פתיחה הנדסית: יש לאשר מול ניתוח מים, טמפרטורה, ריכוז מוצקים וטבלאות יצרן. בטמפרטורה גבוהה או במים עומדים החמירו דרגה: $Cl^- =$ ריכוז כלוריד

מה המחיר של הגזמה

- עלות רכישה גבוהה פי 3 עד 8
- זמני אספקה ארוכים לסגסוגות מיוחדות
- דופלקס שביר יותר בריתוך, דורש ביצוע מדויק
- במים נקיים, ההשקעה לא מחזירה את עצמה

למה לטפס בסולם החומרים

- אורך חיים פי כמה בסביבה תוקפנית
- נצילות נשמרת, טבעות ומאיץ לא נשחקים
- פחות עצירות מתקן ותחזוקת חירום
- אמינות אספקת מים, פחות סיכון רגולטורי

העלות הזולה ביותר היא לטווח ארוך

בחירת חומר זול מדי היא לרוב היקרה ביותר לאורך זמן. מאיץ יצקת בקידוח מליח אולי חוסך כסף ברכישה, אך יישחק וינוקב תוך שנתיים, יאבד נצילות חודש אחר חודש, ויחייב החלפה תוך עצירת מתקן יקרה. נירוסטה או דופלקס שעולים יותר ברכישה מחזירים את עצמם פעמיים: בעמידות, ובנצילות שנשמרת לאורך כל חיי המשאבה. זו אינה החלטת רכש, אלא שיקול מחזור חיים, שאליו נחזור בכלים כלכליים מלאים בפרק 26.

אז מה? הנזל קובע את המתכת. מים מתוקים נקיים סלחניים, אבל מליחות, כלורידים, חומציות וחול הופכים את בחירת החומר להחלטה קריטית שמכריעה אם המשאבה תחזיק שנתיים או עשרים. שלושה מנגנוני בלאי, פתרון חומרי לכל אחד, התאמה גלוונית בין כל הרכיבים הרטובים, ומדד PREN לדירוג עמידות הכלוריד. במציאות הישראלית של מים מליחים, קולחים וקידוחים מלאי חול, זו אינה פינה תאורטית אלא הסעיף שמכריע את אורך החיים ואת מחיר מחזור החיים. אל תבחר חומר בלי ניתוח מים ביד.

קישורים בספר

בלאי טבעות השחיקה והאיבוד הנפחי שהוא יוצר, פרק 4. בחירת גוף ולשון מול דחף רדיאלי, פרק 8. שורש הקוויטציה וחישוב NPSH, פרק 14. שיקולי מחזור חיים, עלות אנרגיה ו-LCC לבחירת חומר, פרק 26.

10

טבעות שחיקה: המרווח, החומרים וההיתקעות

Wear Rings: Clearance, Materials & Galling

בקצרה

בפרק הקודם בחרנו מתכת לכל רכיב רטוב מול הנוזל. עכשיו מתמקדים ברכיב אחד קטן, זול ומתחלף שמכריע יותר מכל אחר את הנצילות לאורך השנים, **הטבעת שחיקה**. היא שומרת על מרווח זעיר בין המאיץ המסתובב לגוף הנייח, ובמרווח הזה מסתתר כל הסיפור: צמצם אותו והנצילות עולה; צמצם אותו מדי, והמשאבה נתקעת בהפעלה הבאה.

הפרק פורש את שלוש ההכרעות שמתנגשות זו בזו: **המרווח** (נצילות מול היתקעות), **זוג החומרים** (לא חומר אחד אלא שניים שלא ילחימו זה לזה), ו**סוג המים**, קידוח גלם עם חול, מי שתייה וקולחים, שלכל אחד תשובה אחרת. נראה במה גוף חצוי שונה מטורבינה אנכית, ולמה לאותה משאבה בדיוק נבחר מרווח אחד אם היא עובדת 24/7 ומרווח אחר אם היא נדלקת ונכבית כל היום.

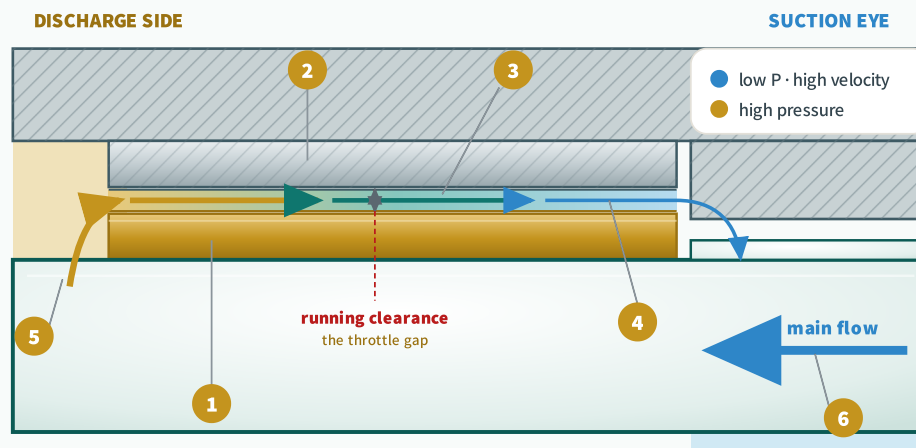
למה טבעת שחיקה קיימת בכלל

המאיץ מעלה את הלחץ. ההפרש בין הלחץ הגבוה במוצא ללחץ הנמוך בעין היניקה לא נעלם, הוא דוחף נוזל בחזרה דרך כל מרווח פתוח. טבעת השחיקה היא המחנק שמגביל את הזרימה האחורית הזו.

בלי טבעת, חלק מהנוזל שכבר קיבל אנרגיה היה דולף סביב חזית המאיץ בחזרה ליניקה, ומסתובב במעגל סגור בלי לצאת מהמשאבה. זו ה**נזילה הפנימית** (*internal leakage*), מקור ה**איבוד הנפחי** שפגשנו בפרק 4. טבעת השחיקה יוצרת מסלול ארוך וצר, מרווח טבעתי של עשיריות מילימטר, שדרכו הזרימה האחורית נחנקת כמעט לאפס. ככל שהמרווח קטן יותר, הנזילה קטנה יותר והנצילות הנפחית גבוהה יותר. משאבת מים חדשה ובנויה היטב מגיעה לנצילות נפחית של בערך 95%, כלומר רק כ-5% מהספיקה מבזבזת אנרגיה על סיבוב במעגל.

שני סוגי טבעות, אותו עיקרון

הזוג השוחק מורכב משני חלקים: **טבעת המאיץ** (*impeller / rotating ring*) שמסתובבת עם המאיץ, ו**טבעת הגוף** (*casing / stationary ring*) שקבועה בגוף. שתיהן מתחלפות, אבל הרעיון המרכזי הוא ה**קרבה מכוונת**: הטבעות זולות וקלות להחלפה, ולכן הן נשחקות במקום המאיץ והגוף היקרים. כשהמרווח גדל מדי, מחליפים זוג טבעות בכמה אלפי שקלים, לא מאיץ שלם בעשרות אלפים. זו אותה פילוסופיה של רכיב-קרוב שראינו באנודות בפרק 9.



● gap too SMALL → rub · galling · seizure

● gap too LARGE → leakage · lost efficiency

1 impeller wear ring (rotating) · 2 casing wear ring (stationary) · 3 running clearance (throttle)
4 internal leakage path · 5 high-pressure (discharge) side · 6 suction eye (low pressure)

איור 10.1 · חתך דרך אזור עין המאיץ, במקום שבו יושבת טבעת השחיקה. הצבע מקודד את הפיזיקה: הזרימה זהובה בצד הסניקה (לחץ גבוה) ודוהה דרך המרווח לכחול בעין היניקה (לחץ נמוך, מהירות גבוהה). המרווח הצר בין הטבעת המסתובבת (זהב/ברונזה) לטבעת הנייחת (פלדה) הוא ה"שנק" שמוסת את הדליפה הפנימית – החץ המתחדד מאבד לחץ כשהוא חוצה אותו בחזרה אל היניקה. זהו ליבת התכן: מרווח צר מדי ← שפשוף, galling ותקיעה; מרווח רחב מדי ← דליפה ואיבוד נצילות.

סכמטי · לפי עקרונות KSB / Hydraulic Institute

המרווח: לב העניין

המרווח אינו שרירותי. יש לו ערך תכן שמגיע מטבלאות תקן, הוא נמדד באלפיות המילימטר, וכל סטייה ממנו, למעלה או למטה, עולה כסף או סיכון. נתחיל מהמספרים.

כמה מרווח? טבלת התקן

הסטנדרט המקצועי הנפוץ למרווחי טבעות הוא API 610 (גם ISO 13709), תקן משאבות התהליך שכלליו אומצו הרבה מעבר לתעשיית הנפט. המרווח גדל עם קוטר הטבעת, כי טבעת גדולה יותר סובלת שינויי מידה גדולים יותר מחום ומכוחות. הטבלה נותנת את **המרווח האלכסוני** (diametral), כלומר ההפרש בין הקטרים. המרווח **הרדיאלי** בכל צד הוא חצי מזה.

טבלה 10.1 • מרווחי ריצה אלכסוניים מינימליים לפי API 610 (כלי עזר)

קוטר הטבעת המסתובבת	מרווח אלכסוני מיני (mm)	אינץ' שווה ערך
50 mm < (2" >)	0.25	0.010"
50–65 mm (2–2.5")	0.28	0.011"
80–90 mm (3–3.5")	0.33	0.013"
100–115 mm (4–4.5")	0.38	0.015"
200–225 mm (8–9")	0.50	0.020"
300–325 mm (12–13")	0.60	0.024"
450–475 mm (18–19")	0.75	0.030"
600–625 mm (24–25")	0.90	0.036"

API 610 / ISO 13709, טבלת מרווחי הריצה המינימליים · אין "תקרה" בקוטר 12", הטבלה ממשיכה בתוספת של בערך 0.025 mm לכל 25 mm קוטר נוסף · הערכים אלכסוניים, הרדיאלי = חצי

כלל אצבע סגור שמתמצת את הטבלה: המרווח האלכסוני מתחיל ב-0.25 mm (כ-0.010") עד קוטר 50 mm, ועולה בערך 0.025 mm לכל 25 mm קוטר נוסף. אבל שים לב לסעיף שמכריע באמת בשטח, התוספת לחומרים מועדים להיתקעות.

נוסחה 10.1 · תוספת המרווח להיתקעות (API 610)

$$C_{\text{final}} = C_{\text{table}} + 0.125 \text{ mm } (0.005")$$

מתי	מוסיפים את 0.125 mm כשזוג החומרים מועד להיתקעות (galling), או כשהטמפרטורה עולה מעל 260°C (לא רלוונטי למים, אך זה ניסוח התקן).
למה	חומרים שנוטים להילחם זה לזה צריכים יותר "אוויר" כדי לא להיתקע במגע רגעי. עדיף לוותר על שבריר נצילות מאשר לסכן השבתה.
היפוך	זוג עמיד-היתקעות (קושי שונה, ברונזה, חומר אנטי-גולינג) יכול לרוץ על המרווח הקטן מהטבלה, וזה בדיוק הרווח בנצילות.

נזילה מול מרווח: כמה עולה מרווח שנפתח

הקשר בין המרווח לנזילה אינו ליניארי. בזרימה למינרית טהורה הנזילה גדלה בקירוב **כחזקה שלישית** של המרווח, אבל במרווח טבעת אמיתי, עם מים בלחץ גבוה ובמהירות פני שטח גבוהה, הזרימה **טורבולנטית** והחזקה מתרככת. בפועל, כלל השדה הזהיר שמהנדסי תחזוקה עובדים לפיו הוא פשוט: **כשהמרווח מכפיל את עצמו, הנזילה לפחות מכפילה את עצמה**. אל תתווכח עם החזקה המדויקת מול סוקר, הצג טווח: למינרי C^3 , טורבולנטי בערך $C^{1.5}$, וכלל שדה "מכפיל".

ההשלכה על נקודת העבודה ברורה: ככל שהמרווח נפתח מבלאי, יותר נוזל מסתובב במעגל פנימי, הספיקה לצרכן יורדת, והמשאבה צורכת אותו הספק על פחות מים מועילים. **הנצילות יורדת**. כלל אצבע מקובל בתעשייה: **כל הכפלה של המרווח גוזלת בערך עד 3 5 נקודות נצילות**,

יותר במשאבות מהירות-סגולית נמוכה ועומד גבוה, שבהן הפרש הלחץ על הטבעת גדול. מכאן גם כלל ההחלפה המעשי, "כלל ה-2×": **כשהמרווח הנמדד מגיע לכפול ממרווח התכן, מתכננים החלפה.**

אפקט לומאקין: הטבעת היא גם מיסב נסתר

מעבר לחניקת הנזילה, המרווח הטבעתי הצר יוצר כרית מים שמרכזת את הרוטור, ה **אפקט של לומאקין** (*Lomakin effect*). כשהרוטור סוטה מהמרכז, הזרימה הא-סימטרית במרווח יוצרת כוח לחץ שמחזיר אותו. הקשיחות הזו פרופורציונית ל- $1/c$: חצי מרווח, כפל קשיחות. כשהטבעות נשחקות והמרווח נפתח, הקשיחות הזו **הולכת לאיבוד**, המהירות הקריטית הראשונה של הרוטור יורדת, והרעידות עולות, מה שמאיץ עוד יותר את הבלאי. לכן טבעת שחוקה אינה רק בעיית נצילות, היא גם בעיית רעידות (פרק 23).

דוגמה 10.1 • כמה עולה בכסף מרווח שנפתח בקידוח חולי

משאבת בור עובדת רציף, 24/7. אחרי שלוש שנים בקידוח עם מעט חול, החול "ליטש" את הטבעות והמרווח הגיע לכפול מהתכן. נמדדה ירידה של ארבע נקודות נצילות. כמה זה עולה בחשמל בלבד?

$$P = 45 \text{ kW} \cdot 8,000 \text{ h/yr} = \text{שעות} \quad \eta: 72\% \rightarrow 68\% \cdot 0.50 \rightarrow \text{מתח נמוך} \quad \text{kWh}$$

$$1 \quad 45 \text{ kW} \cdot 8,000 \text{ h} = 360,000 \text{ kWh/yr} \quad \text{אנרגיה שנתית בסיסית:}$$

2 אותם מים, נצילות נמוכה יותר, ההספק עולה ביחס

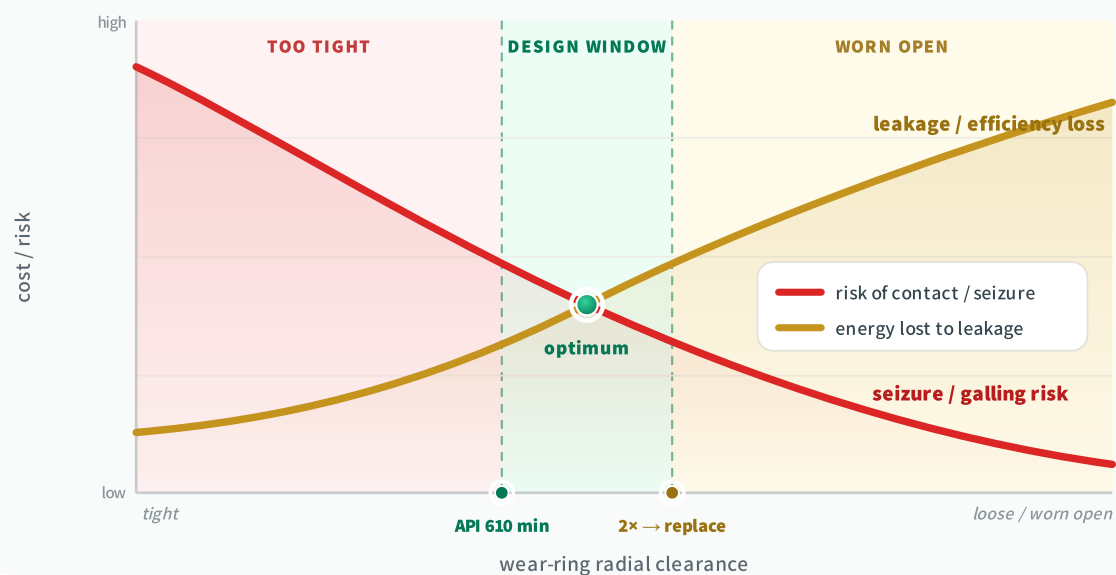
$$\eta_1/\eta_2 = 0.72 / 0.68 = 1.0588 \rightarrow +5.9\%$$

$$3 \quad 360,000 \cdot 0.059 \approx 21,200 \text{ kWh/yr} \quad \text{אנרגיה מבוזבזת לשנה:}$$

$$4 \quad 21,200 \text{ kWh} \cdot \approx 0.50 = \approx 10,600/\text{yr} \quad \text{עלות לשנה:}$$

תוצאה: המרווח שנפתח "שורף" כ-**10,600 ש"ח** בשנה, בלי שאף מד התריע. החלפת זוג טבעות בכ-**5,000 ש"ח** מחזירה את ההשקעה **בפחות מחצי שנה**, ואז ממשיכה לחסוך. זה בדיוק הטיעון הכלכלי של פרק 4, מיושם על הרכיב שגרם לו.

הערה על התעריף. 0.50 ש"ח/קוט"ש הוא אומדן קדימה למתח נמוך, ללא מע"מ, לפי המתח של התחנה (מתח גבוה / מ"ג $\rightarrow$ 0.40 ש"ח). אין לקבע מספר זה, יש לקחת אותו מטבלת התעריפים המעודכנת.



איור 10.2 · שתי עלויות מנוגדות שנקבעות ממרווח טבעת השחיקה. ככל שהמרווח tight מימין לשמאל, עקום הסיכון למגע ולתפיסת המתכת (seizure / galling) באדום מטפס; ככל שהמרווח loose, עקום אובדן הנצילות מדליפה (leakage) בזהב מטפס. שתי העקומות נחתכות בתוך **חלון התכן הירוק** (design window), ושם, בעיגול הירוק (optimum), העלות המשולבת הנמוכה ביותר. הכלל: בוחרים את החלון, לא קצה. הסמן השמאלי (API 610 min) הוא המרווח המינימלי המותר, והסמן הימני (2x → replace) הוא מרווח שחוק שמחייב החלפה.

סכמטי · יחס איכותי בין מרווח טבעת שחיקה לעלות הדליפה ולסיכון התפיסה

ההיתקעות: כשמרווח קטן מדי הופך לאסון

השאיפה לנצילות דוחפת אותנו לצמצם את המרווח. אבל יש קיר. כשהטבעת המסתובבת נוגעת בניחת ולו לרגע, הסיכון אינו שחיקה הדרגתית אלא כשל פתאומי ואלים, היתקעות.

ההיתקעות (galling) אינה שחיקה אברסיבית. היא **בלאי הדבקתי**, ריתוך-קר: כששני משטחי מתכת חלקלקים מחליקים זה על זה בלחץ ובלי שכבת מים מפרידה, פסגות מיקרוסקופיות נלחמות זו לזו, נקרעות, ומעבירות מתכת ממשטח למשטח. המשטח מתחספס, המרווח נסגר עוד יותר, וחוזר חלילה עד שהרוטור **נתקע**. עם טבעות מתכת, הרוטור עוצר לפעמים בבת אחת, מה שמסכן את הציר, האטם והמצמד.

למה ההפעלה היא הרגע המסוכן

בזמן ריצה יציבה יש שכבת מים הידרודינמית שמפרידה בין הטבעות. אבל **ברגע ההתנעה** השכבה עוד לא נבנתה, זה משטר **סיכה גבולית (boundary lubrication)**, מגע מתכת-מתכת כמעט ישיר. נוסף על כך, בהתנעה ובמעברי חום יש **התפשטות תרמית** שונה בין רוטור לגוף, והמרווח נסגר רגעית. לכן רוב ההיתקעויות קורות בהדלקה הראשונה אחרי תיקון, בהפעלות חוזרות, או בריצה בספיקה נמוכה מאוד שבה הרוטור סוטה. משאבה שרצה 24/7 כמעט לא חשופה לזה; משאבה שנדלקת עשר פעמים ביום, חשופה מאוד.

המספר שמסביר הכול: למה אסור 316 מול 316

הנירוסות האוסטניטיות הרגילות, 304 ו-316, הן רכות יחסית ושכבת התחמוצת שלהן נשברת בקלות בחיכוך. התוצאה דרמטית במספרים: זוג 304 מול 304 מתחיל להיתקע כבר במאמץ מגע של בערך 2 ksi (כ-14 MPa), כלומר כמעט בכל מגע. לעומת זאת חומר אנטי-היתקעות ייעודי כמו Nitronic 60 עומד מעל 50 ksi (כ-345 MPa) לפני היתקעות, פי עשרים וחמישה טוב יותר.

מכאן הכלל הברזל: **לעולם לא לרוץ אוסטניטי מול אוסטניטי זהה**. מאיץ נירוסטה 316 עם טבעות 316 הוא טעות רכש קלאסית שמסתיימת בהיתקעות בהדלקה הראשונה. אם הרכיבים הרטובים מ-316, הטבעת חייבת להיות חומר אחר, או מוקשה, או מצופה.

נוסחה 10.2 • כלל הפרש הקושיות (API 610)

$$\Delta HB \geq 50 \quad (HB \text{ אלא אם שני המשטחים } \leq 400)$$

הכלל	בין שני משטחי הטבעות חייב להיות הפרש קושי של לפחות 50 בריינל, אלא אם שניהם כבר קשים מאוד (מעל 400 HB).
למה	הפרש קושי שובר את סימטריית ההיתוך: הפסגות של המשטח הרך נגזרות במקום להילחם לקשה. שני משטחים זהים בקושי הם המתכון הגרוע ביותר.
סייג	בשירות עם גופרימן (H_2S) בקולחים, הטבעת המסתובבת מוגבלת לקושי מתחת 22 HRC לפי NACE MR0175, מה שמצמצם את אפשרויות הזיווג.

זוגות חומרים: לא חומר אחד אלא שניים

זו הנקודה שמבדילה בין בחירת טבעות לבחירת גוף או מאיץ. טבעת לא נבחרת לבד. בוחרים **זוג**, רוטור מול ניח, שצריך לעמוד בו-זמנית בשלושה מבחנים: לא להיתקע, לא להיקרז, ולא להישחק.

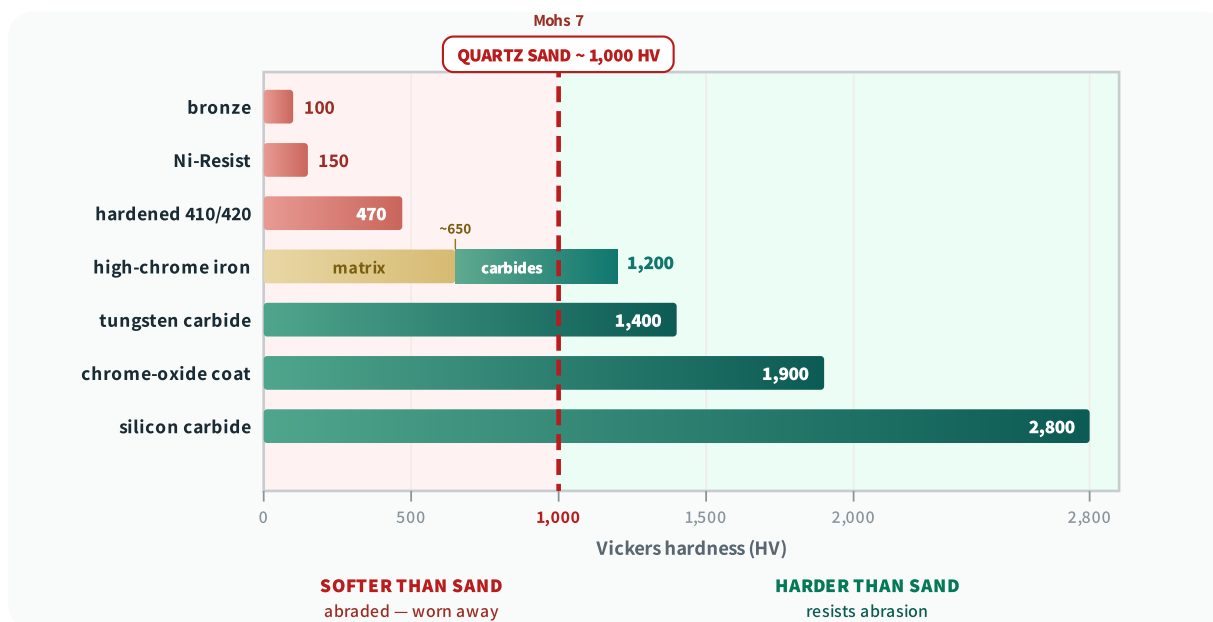
טבלה 10.2 • זוגות חומרים נפוצים לטבעות שחיקה (כלי עזר)

זוג / חומר	קושי טיפוסי	היתקעות	אופי שימוש
ברונזה מול יצקת / פלדה	HB ~170	מצוין	מים נקיים, הזוג הקלאסי הסלחני
יצקת מול יצקת (מתון)	HB ~180–220	טוב	מים מתוקים, מסורתי
Ni-Resist (יצקת ניקל)	HB ~130–200	טוב	עמיד קורוזיה, רך מהחול
נירוסטה מרטנזיטית מוקשה 410/420	HB ~400–450	טוב עם הפרש קושי	קשה מול קשה, צריך היסט קושי
Nitronic 60 (אנטי-גולינג)	HB ~205	מצוין (גם זהה מול זהה)	פותר את בעיית האוסטניטי, שירות מחזורי
ברונזת ניקל-אלומיניום C95800	HB ~200–230	טוב מאוד	נטול עופרת, מי שתייה + ימי
ריפוד קשה (סטליט) / קרביד / קרמי	HRC 40–70	מצוין	חול, אברסיה כבדה, גב הלהב
טבעות פולימר הנדסי (PEEK) / קומפוזיט	לא-מתכתי	אין מגע מתכתי	סובל מגע, מאפשר מרווח הדוק

קושי: HB = בריינל, HRC = רוקוול C • להשוואה בלבד, לאישור מול ניתוח מים וטבלאות יצרן

שלוש דרכים לשבור את הדילמה הדוק-מול-בטוח

- **היסט קושי**, להקשות או לצפות רק את אחת הטבעות (קל יותר להקשות את הצד החיצוני של טבעת המאיץ), כך שעומדים בכלל ה-HB 50 בלי לוותר על מרווח.
- **סגסוגת אנטי-היתקעות**, Nitronic 60 רץ אפילו זהה-מול-זהה בלי להיתקע, ומחליף את הקובלט היקר (סטליט) במקרים רבים.
- **טבעות פולימר**, PEEK או קומפוזיט סופגים מגע רגעי בלי להיתקע, ולכן מאפשרים לרוץ דווקא במרווח **הדוק יותר**, מרוויחים נצילות וגם בטיחות. השובר הכי אלגנטי של חלון התכן.



איור 10.3 · האם החומר מנצח את החול? קו אדום מקווקו מסמן את קושי גרגרי החול (קנרץ, Mohs 7, ~1,000 HV): כל חומר משמאלו (אזור אדום) רק מהחול ונשחק; כל חומר מימינו (אזור ירוק) קשה ממנו ועומד בבלאי. ברונזה, Ni-Resist, ופלדה מוקשית 410/420 נופלים מתחת לחול ומגינים חלקית בלבד. **ברזל בעל אחוז כרום גבוה** הוא גיבור הגבול: המטריצה שלו רכה (~650 HV), אך הקרבידים הקשים בתוכה (~1,200 HV) חוצים את הקו ומנצחים את החול – ולכן הבר שלו שוחה משני צדי הקו. מעליו קרביד טונגסטן, ציפוי כרום-תחמוצת וקרביד סיליקון, שכולם קשים בהרבה מהחול.

סדר גודל אופייני של קושי ויקרס · ערכים מייצגים, משתנים לפי הרכב וטיפול תרמי

שלושת המים הישראליים

עכשיו מחברים הכול לשטח. אותו תכן הידראולי, שלושה מימים שונים, ושלוש תשובות שונות לחלוטין לשאלת הטבעות. ההבדל אינו בהידראוליקה אלא בכימיה ובחול.

קולחים

האויב הוא **שניהם**. קורוזיה (כלוריד, גופרימן, ביופילם) וגם גריט אברסיבי יחד, סינרגיית שחיקה-קורוזיה. צריך גם דרגת נירוסטה גבוהה וגם קושי פני שטח.

מי שתייה

האויב הוא **תקינה**. אברסיה נמוכה, אבל כל רכיב רטוב חייב אישור בריאותי. ברונזה עם עופרת אסורה. כאן מותר למקסם נצילות.

מי קידוח גלם + חול

האויב הוא **אברסיה**. החול קשה מהמתכת, מליטש את המרווח ופותח אותו. החומר חייב לעמוד מול החול, והמרווח ייפתח ממילא, אז מתכננים להחלפה.

מי קידוח גלם עם חול: קרב מול האברסיה

זה כשל המשאבות מספר אחת בקידוחי ישראל. החול, גרגרי קוורץ בקושי של בערך 1,000 HV, קשה מהברונזה (~100 HV) ומהניקל-יצקת (~150 HV) שממן בנויות טבעות מים סטנדרטיות. הוא נכנס למרווח השוחק ופועל שם כשחיקה תלת-גופית (*three-body abrasion*), ממש כמו משחת ליטוש: שוחק את שני המשטחים ופותח את המרווח. ככל שהמרווח נפתח, מהירות הנזילה עולה, יותר חול עובר, והשחיקה מאיצה את עצמה.

שני מנופים שולטים בקצב. **קושי**, החומר חייב להיות מימין לקו החול באיור 10.3: יצקת עתירת כרום (25–30% Cr, מעל 600 HB), קרביד טונגסטן או קרמיקה. **מהירות**, השחיקה גדלה בערך כחזקה שלישית של המהירות, ולכן חיתוך המהירות לחצי מוריד את הבלאי פי שמונה בקירוב. בקידוח חולי עדיף סל"ד נמוך וחתך זרימה גדול (יותר דרגות בעומד נמוך לכל דרגה) מאשר מאיץ קטן ומהיר. כסף שמושקע בסל"ד ובחומר חוזר פי כמה באורך חיי הטבעות.

סף החול והתכן להחלפה

נתון יצרן שימושי: משאבות בור טבולות סטנדרטיות (סדרת Grundfos SP וכדומה) מדורגות לתכולת חול של עד גרם/מ"ק 50 (50 mg/L); מעבר לכך אורך חיי החלקים מתקצר מאוד, ודגמים סובלי-חול מגיעים עד גרם/מ"ק 150. בקידוח חולי הקבלה ההנדסית הנכונה היא: המרווח **ייפתח**, אי-אפשר למנוע זאת לגמרי. לכן מתכננים לטבעות מתחלפות, גישה נוחה להחלפה, וניטור נצילות תקופתי, ולא מתאבדים במרווח ההתחלתי.

מי שתייה: התקינה קובעת

במי שתייה האברסיה נמוכה, וזו הזדמנות למקסם נצילות עם מרווח הדוק וחומר טוב. אבל נכנס שחקן חדש, **תקינה בריאותית**. כל חומר רטוב, כולל הטבעות, חייב להיות מאושר למגע עם מי שתייה. בארה"ב התקנים הם NSF/ANSI 61 (כמה מזהם רשאי לנדוף מהחומר למים) ו-NSF/ANSI 372 (תכולת עופרת, "נטול עופרת" = ממוצע משוקלל עד 0.25%).

זו בעיה אמיתית לטבעות, כי הברונזה הקלאסית לטבעות ומיסבים, C83600 (ברונזה אדומה), מכילה בכוונה **כ-עופרת 4–6%**. העופרת משפרת עיבוד שבבי, אוטמת נקבוביות, ומשמשת כמשחה מוצקה נגד היתקעות, בדיוק מה שעשה אותה לחומר טבעות מושלם, ובדיוק מה שפוסל אותה למי שתייה. החלופות הן ברונזות נטולות עופרת (C87850 סיליקון-פליז, C89833 ביסמוט-פליז) או **ברונזת ניקל-אלומיניום C95800**, שנטולת עופרת מטבעה, קשה (200–230 HB) ובעלת עמידות היתקעות וקורוזיה מצוינת, ולכן בחירת טבעות מועדפת למי שתייה. נירוסטה 316L ודופלקס תקינות אף הן מבחינה בריאותית.

ישראל ואירופה

באיחוד האירופי המקבילה היא רשימות החומרים החיוביות (UBA / 4MS) תחת הנחיית מי השתייה 2020/2184, עם סף עופרת מחמיר עוד יותר באלומיניום-נחושת (לרוב עד 0.1%). השורה התחתונה לישראל: בשירות מי שתייה אי-אפשר לבחור טבעת ברונזה "כי ככה תמיד", צריך חומר מאושר, נטול עופרת או נירוסטה.

קולחים: צרה כפולה

קולחים הם המקרה הקשה כי שני האויבים תוקפים יחד. מצד הכימיה: **כלוריד** שמנקב נירוסטה בגומות, **גופרימן** (H_2S) מפעילות אנאירובית, כלור שיורי, pH נמוך, ו **קורוזיה מיקרוביאלית** (*MIC*) מתחת לביופילם של חיידקים מחזרי גופרה. מצד המכניקה: גם קולחים שניוניים ושלישוניים נושאים **גריט** דק ששוחק את הטבעות. שני אלה יוצרים **שחיקה-קורוזיה** (*erosion-corrosion*) סינרגטית: הגריט מקלף את שכבת המגן הפסיבית של הנירוסטה, המתכת החשופה נתקפת, והגריט הבא מקלף שוב. הקצב מהיר משני המנגנונים בנפרד.

לכן בקולחים בוחרים על שני צירים בו-זמנית: **דרגת נירוסטה**, 316L כרצפה, **ודופלקס 2205** כשהכלוריד או הגופרימן גבוהים (PREN כ-34 מול כ-24 ל-316L, נוסחת ה-PREN בפרק 9); ו**קושי פני שטח** מול הגריט, טבעות מוקשות, Nitronic 60 או ריפוד/ציפוי קשה. אם יש H_2S , זכור את תקרת ה-22 HRC של NACE לטבעת המסתובבת, שמגבילה את הזיווג.

טבלה 10.3 • בחירת זוג טבעות לפי מים וסוג משאבה (נקודת פתיחה)

סוג מים	גוף חצוי (טבעות רדיאליות)	טורבינה אנכית (טבעת תא)	פילוסופיית מרווח
מי שתייה אברסיה נמוכה	ברונזה נטולת עופרת C95800 / 316L מוקשה מול גוף	טבעת תא ברונזה נטולת עופרת, מאיץ סגור	הדוק, מקסם נצילות, חומר מאושר
קידוח גלם + חול אברסיה גבוהה	יצקת עתירת כרום / קרביד, או ריפוד קשה	טבעת תא מוקשה / קרביד, מסבי קרביד-טונגסטן	קבל פתיחה, תכנן להחלפה, נטר נצילות
קולחים קורוזיה + גריט	316L / דופלקס 2205 + טבעת מוקשה/מצופה	תא דופלקס / מאיץ דופלקס + טבעת קשה	בינוני, היסט קושי, 22 HRC אם H_2S

נקודת פתיחה הנדסית • לאשר מול ניתוח מים (כלוריד, H_2S , חול), טמפרטורה וטבלאות יצרן • בטמפרטורה גבוהה או מים עומדים, החמר דרגה

גוף חצוי מול טורבינה אנכית

לשני סוגי המשאבות הנפוצים במים, גוף חצוי דו-יניקתי וטורבינה אנכית, ארכיטקטורת טבעות שונה לגמרי. ההבדל משנה איך בוחרים מרווח, איך מתחזקים, ואיפה אורבת ההיתקעות.

גוף חצוי: ארבעה משטחים, שירות מלמעלה

המאיץ הדו-יניקתי שואב משני הצדדים, ולכן הדחף הצירי מאוזן הידראולית (פרק 8). בכל צד יש זוג טבעות, טבעת מאיץ מסתובבת מול טבעת גוף נייחת, סך הכול **ארבעה משטחי שחיקה**, **שני זוגות**. טבעת הגוף היא רכיב הקרבן הזול: מחליפים אותה במקום לעבד מחדש את הגוף. היתרון הגדול לתחזוקה הוא **הפיצול האופקי**: מרימים את חצי הגוף העליון וניגשים לרוטור,

למאיץ, לטבעות ולמסבים בלי לפרק את הצנרת או המנוע. זו אחת הסיבות שגוף חצוי הוא סוס העבודה של הולכת מים בספיקה גבוהה.

טורבינה אנכית: טבעת רדיאלית או מרווח צירי

בטורבינה אנכית התמונה תלויה בסוג המאיץ, וזה הבדל מהותי:

1 מאיץ סגור

1

רץ מול **טבעת אטם תא** (*bowl seal ring*) רדיאלית, רעיונית כמו טבעת גוף חצוי. בתאים גדולים הטבעת מתחלפת (ברונזה); ביחידות קטנות המאיץ רץ ישירות בקדח התא היצוק ומחליפים את התא כולו.

2 מאיץ פתוח / חצי-פתוח

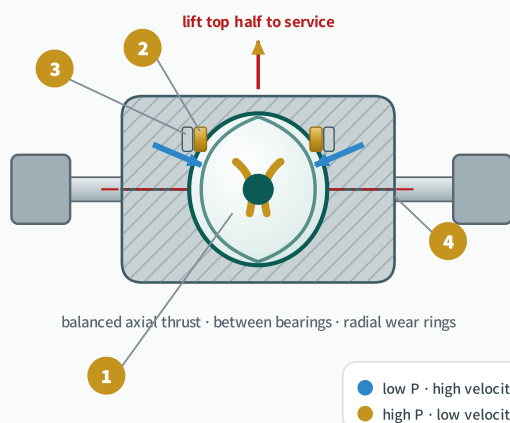
2

אין טבעת רדיאלית כלל. הלהבים רצים מול מושב התא ב**מרווח צירי** (*axial / lateral clearance*) שנקבע מהאום בראש המשאבה. הנצילות יורדת מהר יותר ככל שהמרווח הצירי נפתח, ודורשת כיוון תקופתי בשטח.

הכיוון הזה, **הסט הצירי** (*lateral setting*), הוא נקודת תורפה ייחודית לטורבינה אנכית. מרימים את המאיץ מעט מעל המושב באמצעות אום הכוונן. למאיץ פתוח המרווח הנדרש הוא בערך $0.015''$ (0.38 mm) לעשרת הרגל הראשונים של עומק, ועוד $0.010''$ (0.25 mm) לכל עשר רגל נוספות, כדי לפצות על **מתיחת הציר** בעומק. שגיאת התקנה קלאסית: לכוון מאיץ פתוח לערך של מאיץ סגור (כמה מילימטרים), והמאיץ גורר על התא ונשרט תוך דקות; או הפוך, לכוון נמוך מדי ולגרום **היתקעות מיידי** בהדלקה. זרם המנוע (אמפר) הוא מד עקיף טוב לסט: סט נמוך מדי מעלה עומס, סט גבוה מדי מוריד עומס ונצילות.

SPLIT-CASE • DOUBLE SUCTION

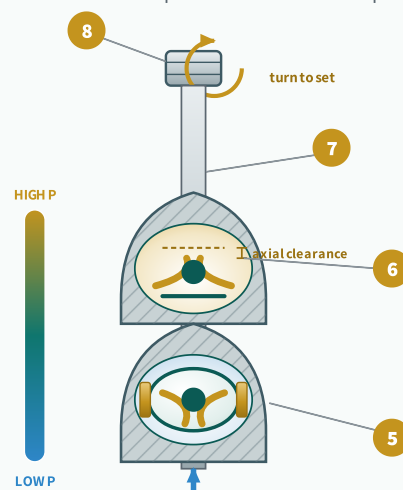
4 ring faces • balanced thrust • radial wear rings



1 double-suction impeller • 2 impeller wear ring • 3 casing wear ring • 4 split line (top-half access)
5 enclosed impeller + radial seal ring • 6 semi-open impeller + axial clearance • 7 lineshaft • 8 adjusting nut

VERTICAL TURBINE • BOWL STACK

enclosed vs semi-open • clearance set from top nut



lower = enclosed → radial seal ring • upper = semi-open → axial clearance

איור 10.4 • שתי ארכיטקטורות של טבעות חזיקה זו מול זו. **משמאל – גוף מפוצל דו-יניקה:** מאיץ דו-יניקתי בין שני מיסבים, שואב משני הצדדים (שני חיצו הכניסה הכחולים) כך שהדחף הצירי מאוזן; ארבע פני טבעת – שתי טבעות מאיץ מסתובבות (זהב) ושתיים בגוף הנייח (אפור) – והגוף נפתח לאורך קו הפיצול האופקי, כך שמרימים את החצי העליון לתחזוקה בלי לגעת בצנרת. **מימין – טורבינה אנכית, מחסנית תאים:** שני תאים (bowls) ערוכים על ציר-קו אנכי. התא התחתון נושא **מאיץ סגור** הרץ מול **טבעת אטם רדיאלית** (זהב), והתא העליון נושא **מאיץ חצי-פתוח** הרץ מול **מרווח צירי לרוחב** (lateral clearance) במושב התא – בדיוק המרווח שאום הכוונון העליון קובע: מסובבים את האום וכל מערך הרוטור עולה או יורד יחד. קידוד הצבע הוא הפיזיקה – הזרימה נכנסת כחולה למטה (מהירות גבוהה, לחץ נמוך) והופכת זהובה למעלה ככל שהלחץ נבנה דרגה אחר דרגה, כפי שמראה סרגל הלחץ שבצד.

סכמטי • חתך, לא בקנה מידה

מחזור עבודה: 24/7 מול הפעלות חוזרות

זו ההכרעה שהכי קל לפספס. אותה משאבה בדיוק, אותם מים, תקבל אסטרטגיית טבעות הפוכה לפי כמה פעמים ביום היא נדלקת. הסיבה היא שכבת המים בין הטבעות, וההיתקעות שאורבת בכל הדלקה.

מחזור עבודה	הסיכון העיקרי	מרווח	חומר
רציף 24/7 הולכה, באר ראשית	שחיקה אטית שפוחתת מרווח	הדוק, מקסם נצילות	לפי המים; אפקט לומאקין מייצב
הפעלות חוזרות הגברת לחץ, לפי ביקוש	היתקעות בהתנעה, מחזורי חום	שמור שוליים, "+0.005"	זוג סובל-היתקעות / Nitronic 60 / פולימר
גיבוי / המתנה נדלקת לעיתים רחוקות	קורוזיה במרווח בהמתנה, ואז היתקעות	שוליים, חומר אנטי-היתקעות	חומר נטול-היתקעות + הרצות מבחן

רציף 24/7. ברגע שהמשאבה רצה, שכבת מים הידרודינמית ממלאת את המרווח ומפרידה בין הטבעות (אותו אפקט לומאקין שמייצב את הרוטור). מצב תרמי יציב, כמעט בלי הדלקות. כאן **מותר לרוץ הדוק** ולמקסם נצילות נפחית, כי רגעי המגע המסוכנים נדירים. האויב היחיד הוא שחיקה אטית שפוחתת את המרווח לאורך שנים, ועליה עונים בחומר נכון ובניטור.

הפעלות חוזרות. כל הדלקה היא רגע של סיכה גבולית לפני שהשכבה עבנית, בתוספת מחזור חום וסטייה רגעית של הרוטור. הסיכון להיתקעות גבוה בהרבה. כאן **לא רודפים אחרי המרווח ההדוק ביותר:** בוחרים זוג סובל-היתקעות (היסט קושי, Nitronic 60, או טבעות פולימר), שומרים שוליים, ומשתמשים **בהתנעה רכה** (ממיר/סופט-סטרוטר, פרק 19) שמקצרת את חלון הסיכה הגבולית.

גיבוי / המתנה. משאבה שעומדת ימים ואז נדלקת חשופה לכשל מיוחד: בזמן ההמתנה מצטברים קורוזיה ואבנית במרווח, ואז ההדלקה הנדירה פוגשת מרווח "מודבק" ונתקעת. מכאן שתי המסקנות: לבחור חומרים נטולי-היתקעות וסיכה עצמית, ולהריץ הרצות מבחן תקופתיות שמנקות את המרווח ומוודאות שהמשאבה אכן תדלק כשיצטרכו אותה.

הכלל בשורה אחת

רציף → **אופטמלי לנצילות** (מרווח הדוק, חומר שעומד בשחיקה האטית). מחזורי או המתנה → **אופטימלי להישרדות ההתנעה** (זוג סובל-היתקעות, שוליים, התנעה רכה, הרצות מבחן). אותה משאבה הידראולית, אסטרטגיית טבעות הפוכה, שנקבעת כולה לפי מחזור העבודה.

אז מה? הטבעת הקטנה מכריעה את הנצילות לאורך שנים. ארבעה משתנים נפגשים בה: **המרווח** (הדוק = נצילות, הדוק מדי = היתקעות), **זוג החומרים** (לעולם לא אוסטניטי זהה מול עצמו, תמיד הפרש קושי או חומר אנטי-היתקעות), **המים** (חול דורש חומר קשה מהחול; שתייה דורשת חומר מאושר נטול עופרת; קולחים דורשים גם דרגת נירוסטה וגם קושי), **ומחזור העבודה** (רציף מרשה מרווח הדוק; מחזורי דורש שוליים והישרדות התנעה). אל תבחר טבעת "כי ככה תמיד עשינו", זו ההחלטה הזולה שעולה הכי הרבה.

קישורים בספר

הנזילה הפנימית והאיבוד הנפחי שטבעת שולטת בו, פרק 4. דחף צירי וטבעת השחיקה האחורית, פרק 8. משפחות החומרים, PREN וקורוזיה, פרק 9. שורש הקוויטציה ו-NPSH, פרק 15. רעידות ואפקט לומאקין כשמרווח נפתח, פרק 23. עלות מחזור חיים של בחירת חומר ומרווח, פרק 26.



חלק רביעי

טקסונומיה של סוגי משאבות

Pump-Type Taxonomy

סיווג לפי מהירות סגולית וגיאומטריה 11

משפחות המשאבות, אחת לאחת 12

11 סיווג לפי מהירות סגולית וגיאומטריה

Classification by Specific Speed & Geometry

בקצרה

כל המשאבות הרוטודינמיות, מהבוסטר הזעיר ועד משאבת ההצפה הענקית, הן בעצם רצף אחד. מספר אחד, **מהירות סגולית** (n_q), שמשלב את הסיבוב, הספיקה והעומד בנקודת העבודה המיטבית, קובע איפה כל משאבה יושבת על הרצף הזה ואיך נראה המאיץ שלה. ככל ש- n_q עולה, המאיץ **משנה צורה בהדרגה**: מרדיאלי צר וגדול-קוטר (עומד גבוה, ספיקה קטנה), דרך פרנסיס וזרימה מעורבת, ועד אקסיאלי שטוח כמו פרופלר סירה (ספיקה עצומה, עומד נמוך). יחד עם הצורה משתנים גם **צורת עקום ה-H-Q**, **צורת עקום ההספק והנצילות המרבית האפשרית**. הפרק הזה הוא המפתח לכל הטקסונומיה של פרק 12.

מהירות סגולית: מספר אחד שמגדיר את המאיץ

תן לי את הספיקה, העומד והסיבוב של נקודת ה-BEP, ואני אחזיר לך מספר אחד שמספר בדיוק איך נראה המאיץ, גם בלי לראות אותו מעולם.

זו ה**מהירות הסגולית** (n_q , specific speed). למרות השם, היא אינה מהירות פיזיקלית ואין לה משמעות של m/s או rpm. היא **מדד צורה**, מספר טהור שמתאר את היחס בין העומד לספיקה שמשאבה מסוימת מייצרת. שתי משאבות בעלות אותה n_q דומות גיאומטרית גם אם אחת בקוטר 80 mm והשנייה בקוטר 800 mm. בדיוק כפי שמהנדס בנייה מזהה גשר תלוי לעומת גשר קשת לפי היחסים שלו ולא לפי גודלו, כך n_q היא "תעודת הזהות הצורנית" של המאיץ.

הרעיון נולד מ**מניית מדים** ($dimensional analysis$): כשמנתקים את הגודל הפיזי מהמשוואות, נשאר פרמטר אחד שמאחד את כל המשאבות הדומות. הוא מאפשר ליצרן לתכנן מאיץ אחד ולשכפל אותו לכל סדרת גדלים, ומאפשר לדעת מראש איזה סוג משאבה מתאים למשימה, עוד לפני שפתח קטלוג כלשהו.

מהירות סגולית (n_q , specific speed)

מדד צורה חסר ממדים (כמעט) שמשלב סיבוב, ספיקה ועומד ב-BEP. קובע את צורת המאיץ ואת אופי כל העקומות. ערך נמוך = רדיאלי, ערך גבוה = אקסיאלי.

מהירות סגולית של יניקה (N_{ss} , suction specific speed)

אחות תאומה ל- n_q , אך מחליפה את העומד ב-NPSHr. מודדת את "כושר היניקה" של המאיץ, נושא של פרק 15.

נקודת עבודה מיטבית BEP

נקודת הנצילות המרבית. n_q מחושבת תמיד ב-BEP, כי שם הזרימה נקייה ומאופיינת היטב. מחוצה לה היחסים מתעוותים.

הנוסחה והיחידות: היזהר, יש כמה מוסכמות

הנוסחה עצמה פשוטה, אבל היא המקור למבוכה הגדולה ביותר בכל הנדסת המשאבות. הסיבה אינה הפיזיקה אלא **היחידות**. אותה משאבה בדיוק תקבל מספר אחר לגמרי תחת המוסכמה האירופית, האמריקאית, או הצורה חסרת הממד הטהורה. לפני שמשווים שני מספרי מהירות סגולית, חובה לוודא שהם באותה מוסכמה.

נוסחה 11.1 • מהירות סגולית (המוסכמה האירופית, n_q)

$$n_q = n \cdot \sqrt{Q} / H^{0.75}$$

n	מהירות הסיבוב [rpm].
Q	ספיקה ב-BEP [m^3/s] במוסכמה הקלאסית. זהירות: חלק מהמקורות מציבים Q ב- m^3/h , מה שמשנה את הערך פי 60. לאורך הספר הזה Q ב- m^3/s .
H	עומד לדרגה אחת ב-BEP [m]. במשאבה רב-שלבית מחלקים את העומד הכולל במספר הדרגות.
n_q	התוצאה, מדד צורה. ערך נמוך (35–10) = רדיאלי. ערך גבוה (400–160) = אקסיאלי.

הצורה האמריקאית, ה-**מהירות הסגולית** (N_s , US units), משתמשת באותה נוסחה בדיוק אבל עם Q בגלונים לדקה (US gpm) ו- H ברגל (ft). התוצאה גדולה בהרבה, וההמרה בין השתיים קבועה.

נוסחה 11.2 • המרה בין המוסכמות

$$N_s \approx 51.6 \cdot n_q$$

N_s	המהירות הסגולית האמריקאית (gpm, ft, rpm). למשאבת מים כללית הערך נע בערך בטווח 1,500–3,000.
n_q	המהירות הסגולית האירופית (m^3/s , m, rpm). אותה משאבה תקבל ערך בטווח 30–60.
51.6	מקדם ההמרה הקבוע. נובע אך ורק מהמרת היחידות, לא משום פיזיקה חדשה. $N_s = 51.6 \cdot n_q$ תמיד.

מלכודת היחידות, הטעות מספר 1

מהנדס ישראלי שקרא $N_s = 2,000$ בקטלוג אמריקאי וחשב שמשאבתו אקסיאלית, פשוט בלבול מוסכמות. $N_s = 2,000$ אמריקאי שווה ל- $n_q \approx 39$ אירופי, כלומר משאבת מים רדיאלית-אלכסונית רגילה לחלוטין. הכלל: **לעולם אל תשווה מספר מהירות סגולית בלי לדעת את היחידות שמאחוריו**. בספר הזה אנו עובדים תמיד ב- n_q האירופית, עם Q ב- m^3/s ו- H במטרים. אם מקור נתון ב- Q ב-3600 חלקו את Q ב-3600 לפני ההצבה.

תחנת שאיבה מפעילה משאבה במנוע 4 קטבים ($n = 1450 \text{ rpm}$ תחת עומס). נקודת העבודה המיטבית נמדדה בבדיקת נצילות. נחשב את n_q ונסווג את סוג המאיץ.

$$H = 45 \text{ m (ב-BEP, דרגה אחת)} \quad Q = 120 \text{ m}^3/\text{h (ב-BEP)} \quad n = 1450 \text{ rpm}$$

1 נמיר את הספיקה ל- m^3/s (המוסכמה האירופית):

$$Q = 120 / 3600 = 0.0333 \text{ m}^3/\text{s}$$

2 נחשב את שורש הספיקה: $\sqrt{Q} = \sqrt{0.0333} = 0.1826$

3 נחשב את העומד בחזקת 0.75: $H^{0.75} = 45^{0.75} = 17.37$

4 נציב בנוסחה 11.1: $n_q = 1450 \cdot 0.1826 / 17.37 = 15.24$

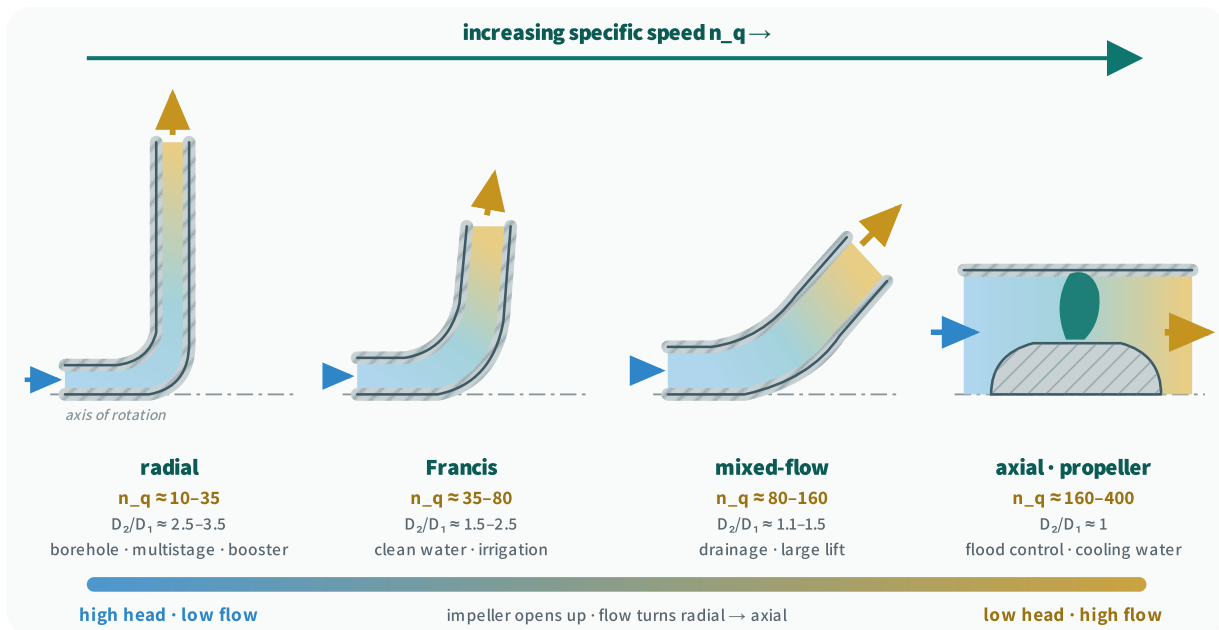
תוצאה: $n_q \approx 15$. לפי טבלה 11.1 זו משאבה **רדיאלית**, מאיץ צר וגדול-קוטר שמייצר עומד גבוה יחסית בספיקה צנועה. צורת עקום ה-H-Q תהיה שטוחה-מתונה, ועקום ההספק יעלה עם הספיקה. במוסכמה האמריקאית: $N_s = 51.6 \times 15.24 \approx 787$ (ביחידות US: rpm, gpm, ft).

ומה אם נחבר אותה ל-VFD ונאיץ ל-2900 rpm? מהירות סגולית גדלה ליניארית עם n , אבל גם H ו- Q משתנים לפי חוקי הדמיות (פרק 14): $Q \propto n$ ו- $H \propto n^2$. נציב את היחסים החדשים: $H = 180 \text{ m}, Q = 240 \text{ m}^3/\text{h}$, ונקבל $n_q = 2900 \cdot \sqrt{(0.0667)/180^{0.75}} \approx 15.24$ שוב.

תובנה עמוקה: נשאר קבועה n_q תחת חוקי הדמיות. שינוי מהירות או קיצוץ מאיץ אינם משנים את סוג המשאבה, רק מזיזים אותה לאורך עקומה משלה. מהירות סגולית היא תכונה של הגיאומטריה, לא של נקודת ההפעלה הרגעית. זו בדיוק הסיבה שהיא כלי סיווג כה חזק.

ספקטרום הצורה: איך המאיץ מתגלגל מרדיאלי לאקסיאלי

הדרך הטובה ביותר להפנים את מהירות הסגולית היא לראות אותה כסרגל אחד שלאורכו צורת המאיץ משתנה בהדרגה. בקצה השמאלי, n_q נמוכה, יושב מאיץ **רדיאלי** (*radial*): צר מאוד ביציאתו, גדול-קוטר, שזורק את הנוזל בזווית ישרה לציר. בקצה הימני, n_q גבוהה, יושב מאיץ **אקסיאלי** (*axial / propeller*): כמו פרופלר של סירה, שדוחף את הנוזל לאורך הציר כמעט בלי לסובב אותו החוצה. בין שני הקצוות שוכנות הצורות המעורבות.



איור 11.1 · ספקטרום מהירות סגולית בחתכים מרידיונליים. הזרימה נכנסת בכחול (לחץ נמוך) ויוצאת בזהוב (לחץ גבוה). ב- n_q נמוך התעלה צרה ומטפסת לקוטר גדול, עומד גבוה בספיקה נמוכה; ככל ש- n_q עולה התעלה נפתחת, היציאה נוטה באלכסון, ובקצה האקסיאלי (propeller) הזרימה כבר אינה פונה החוצה כלל. יחס הקטרים D_2/D_1 מצטמצם מ-3 ל-1 לאורך הסרגל.

סכמטי · מבוסס על דיאגרמת Wislicenus / מסורת KSB-Karassik

ההיגיון מאחורי השינוי הוא פשוט. כדי לייצר **עומד גבוה** צריך מהירות היקפית גבוהה ולכן קוטר חיצוני גדול, אבל ספיקה קטנה דורשת תעלת יציאה צרה. התוצאה היא מאיץ רדיאלי, "פנקייק" דק וגדול. כדי לייצר **ספיקה גדולה** צריך שטח מעבר ענק, ולכן המאיץ מתרחב ומתקצר עד שהוא נראה כמו פרופלר שמושך נפח אדיר לאורך הציר בעומד צנוע. יחס הקטרים D_2/D_1 (קוטר יציאה חלקי קוטר עין היניקה) הוא הביטוי הגיאומטרי הישיר לכך, והוא צונח מ-3 $\approx$ ברדיאלי ל-1 $\approx$ באקסיאלי.

טבלה 11.1 · מהירות סגולית מול סוג מאיץ, יישום ואופי עקום (כלי עזר)

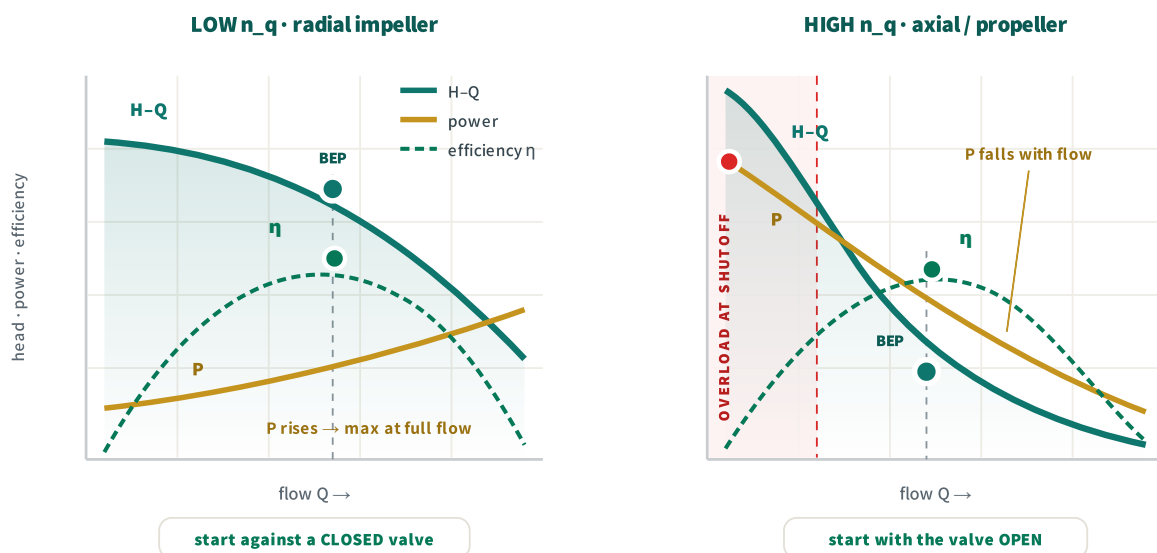
N_q	סוג מאיץ	יישום אופייני	אופי עקום H-Q + הספק
10-35	רדיאלי (radial)	בוסטר, רב-שלבי, קידוח עמוק, עומד גבוה	H-Q שטוח-מתון, הספק עולה עם הספיקה
35-80	פרנסיס / רדיאלי-אלכסוני (Francis)	משאבות מים כלליות, פיצול, השקיה	H-Q מתון, הספק כמעט שטוח
80-160	זרימה מעורבת (mixed-flow)	בור, ניקוז, הרמת מים בספיקה בינונית-גבוהה	H-Q תלול יותר, הספק שטוח עד יורד
160-400	אקסיאלי / פרופלר (axial)	הצפה, ניקוז שטחים, מי קירור בספיקה עצומה	H-Q תלול מאוד, הספק יורד עם הספיקה

למה הגבולות "מטושטשים"

הטווחים בטבלה אינם קווי גבול חדים אלא אזורי מעבר. יצרן אחד יקרא ל- $n_q = 70$ "פרנסיס" והשני "זרימה מעורבת". אין רשות מרכזית שמגדירה גבול מדויק, כי השינוי בצורה הוא **רציף**, לא מדורג. השתמשו בטבלה כמצפן, לא כמדריך טלפונים. מה שחשוב הוא הכיוון: ככל ש- n_q עולה, המאיץ נפתח, העומד יורד והספיקה גדלה, ואיתם משתנה אופי כל העקומות. הערכים המספריים נכונים למסורת האירופית; בדקו תמיד את מוסכמת היחידות.

איך n_q מעצבת את צורת העקומות

הקשר בין מהירות סגולית לצורת המאיץ הוא חצי מהסיפור. החצי השני, החשוב יותר למתכנן ולמנהל אחזקה, הוא שמהירות סגולית קובעת גם את **צורת שלוש העקומות** שכל מהנדס משאבות חי לפיהן: עקום העומד-ספיקה (H-Q), עקום ההספק (P-Q), ועקום הנצילות. ההבדל בין משאבה רדיאלית לאקסיאלית הוא לא רק צורת הגלגל, אלא איך המשאבה מתנהגת כשמשנים את הספיקה.



איור 11.2 · צורת העקומות מול מהירות סגולית: עומד (טורקיז), הספק (זהב) ונצילות (ירוק מקווקו), עם נקודת ה-BEP מסומנת. במשאבה רדיאלית (n_q low, משמאל) עקום ה-H-Q מתון ועקום ההספק **עולה** עם הספיקה, ולכן עומס המנוע המרבי הוא בספיקה מלאה ומתניעים מול ברז סגור. במשאבה אקסיאלית (n_q high, מימין) עקום ה-H-Q תלול מאוד וההספק **יורד** עם הספיקה: המקסימום דווקא בעומד הסגירה (האזור האדום), ולכן מתניעים מול ברז פתוח. זה הופך לחלוטין את כללי ההתנהגות.

סכמטי · להמחשת מגמת ההספק ההפוכה

עקום ההספק: ההבדל המעשי שהכי קל לשכוח

זו אולי התובנה ההנדסית החשובה ביותר בפרק. במשאבה **רדיאלית** (n_q נמוך), ההספק הנדרש עולה ככל שהספיקה גדלה. המשמעות: המנוע צורך הכי הרבה כש"הברז פתוח לרווחה". לכן מתניעים משאבה רדיאלית כשהברז **סגור** או שנוק, כדי שעומס ההתנעה על המנוע יהיה מזערי.

במשאבה **אקסיאלית** (n_q גבוהה), המצב **הפוך לחלוטין**: ההספק הגבוה ביותר הוא דווקא בעומד הסגירה, וההספק **יורד** ככל שהספיקה גדלה. לכן מתניעים משאבת פרופלר כשהברז **פתוח**, אחרת המנוע יישרק בעומד הסגירה. מהנדס שמחיל את "כלל הברז הסגור" הרדיאלי על משאבה אקסיאלית, גורם נזק במו ידיו. שני סוגי המשאבות, שתי פרוצדורות התנעה הפוכות, וההבדל נובע ישירות ממהירות הסגולית.

כלל ההתנעה לפי n_q

- **רדיאלי ($n_q < 40$)**: הספק עולה עם הספיקה. **התנע נגד ברז סגור/שנוק**. כך עומס ומומנט ההתנעה מינימליים.
- **אקסיאלי ($n_q > 150$)**: הספק מקסימלי בעומד סגירה. **התנע נגד ברז פתוח**. ברז סגור = עומס יתר על המנוע.
- **זרימה מעורבת (באמצע)**: עקום ההספק כמעט שטוח, ולכן סובלני יחסית. עדיין, בדקו את עקום ההספק הספציפי לפני שקובעים נוהל.
- **בכל מקרה**: עיינו בעקום ה-P-Q של היצרן. n_q מנבאת את הכיוון, הקטלוג נותן את המספר.

תלילות עקום ה-H-Q ו"כושר ויסות"

מהירות הסגולית קובעת גם כמה **תלול** עקום ה-H-Q. במשאבה רדיאלית העקום מתון יחסית: שינוי קטן בעומד גורר שינוי גדול בספיקה. במשאבה אקסיאלית העקום תלול מאוד: שינוי גדול בעומד גורר שינוי קטן בספיקה. לכן השלכה מעשית ישירה על ויסות. משאבה אקסיאלית שומרת ספיקה כמעט קבועה גם כשהעומד משתנה, ולכן היא מצוינת **להצפת שדות בספיקה יציבה**. משאבה רדיאלית, לעומתה, רגישה יותר לעומד, ולכן מתאימה למערכות לחץ קבוע שבהן הספיקה ממילא משתנה לפי הביקוש.

טבלה 11.2 • n_q נמוך מול גבוה, ההשלכות במבט מהיר

מאפיין	N_Q נמוך • רדיאלי	N_Q גבוה • אקסיאלי
צורת המאיץ	צר, קוטר גדול, $D_2/D_1 \approx 2-3$	דמוי-פרופלר, קוטר קטן, $D_2/D_1 \approx 1$
עומד / ספיקה	עומד גבוה, ספיקה נמוכה	עומד נמוך, ספיקה עצומה
צורת עקום H-Q	מתון יחסית	תלול מאוד
עקום ההספק	עולה עם הספיקה	יורד עם הספיקה (מקסימום בסגירה)
פרוצדורת התנעה	ברז סגור / שנוק	ברז פתוח
דרישת NPSH יחסית	נמוכה יותר	גבוהה יותר

הנצילות המרבית האפשרית תלויה גם ב- n_q

נקודה אחרונה, והיא בעלת משמעות רגולטורית ישירה בשטח. הנצילות המרבית שמאיץ יכול להשיג, גם אם יוצר בשלמות, תלויה ב- n_q שלו. השיא נמצא בערך באזור $n_q \approx 40-60$, שם מאיצים גדולים מגיעים אף ל-92%–88 נצילות משאבה כוללת; אין לבלבל אותה עם הנצילות

הכוללת חשמל-מים הנמדדת בשטח, שכוללת גם את הפסדי המנוע (פרק 25). משני צידי השיא הנצילות יורדת.

בקצה ה- n_q הנמוך (בוסטרים זעירים בעומד גבוה, $n_q < 15$) הנצילות נופלת כי **חיכוך הדיסק** (*disc friction*) של המאיץ הרחב והדק הופך לדומיננטי, ותעלות הזרימה הצרות מאבדות הרבה לחיכוך. בקצה ה- n_q הגבוה (פרופלרים) הנצילות יורדת מעט בגלל הפסדי זרימה ומערבולות בתעלות הרחבות. בנוסף, מאיצים **קטנים** תמיד נופלים מתחת לעקום הזה בגלל מרווחים יחסיים גדולים יותר ושטח מגע יחסי גדול.

למה זה קריטי לבדיקת נצילות בשטח

אם משאבה קטנה ובעלת מהירות סגולית נמוכה מתעקשת לא לעבור 60% נצילות, ייתכן מאוד שזו לא תקלה אלא הגבול הפיזיקלי שלה. אין טעם לדרוש מבוסטר זעיר ב- $n_q = 12$ להגיע ל-75%, פשוט אי אפשר. במקרים כאלה הפתרון הנכון אינו "לתקן את המשאבה" אלא **לבחור מחדש**: מהירות סיבוב גבוהה יותר שמעלה את n_q , או משאבה רב-שלבית שמחלקת את העומד הגבוה לכמה דרגות, כך שכל דרגה תעבוד ב- n_q בריא יותר. זה הרקע ההנדסי שמאחורי המלצות הבחירה בפרק 17, ושמאחורי השיקול אם בכלל כדאי לבדוק נצילות של משאבה מסוימת מול הסף הרגולטורי.



הספק עולה (רדיאלי)
או יורד (אקסיאלי)

40–60

אזור הנצילות
המרבית

51.6

מקדם המרה
 $N_s = 51.6 \cdot n_q$

n_q

מספר אחד
מגדיר את הצורה

מהירות סגולית של יניקה: הקרוב המסוכן

לצד n_q חי מספר תאום, שמשתמש באותה נוסחה בדיוק אבל מחליף את העומד ב-NPSHr, דרישת היניקה של המשאבה. זו **המהירות הסגולית של יניקה** (*suction specific speed, N_{ss}*). בעוד ש- n_q מתארת את צד הלחץ של המאיץ, N_{ss} מתארת את צד היניקה ואת רגישותו לקוויטציה.

נוסחה 11.3 • מהירות סגולית של יניקה

$$N_{ss} = n \cdot \sqrt{Q} / \text{NPSHr}^{0.75}$$

n, Q
אותם n ו- Q כמו ב- n_q , ב-BEP. למאיץ דו-יניקה משתמשים בחצי הספיקה לכל עין.
עודף עומד היניקה הנדרש $[m]$, במקום העומד H . מתואר בהרחבה בפרק 15.
 $N_{ss} > 11,000$ ביחידות אמריקאיות, או ≈ 213 אירופי) מסמן עין יניקה גדולה במיוחד, רגישה לרה-סירקולציה ולקוויטציה. Δ

למה לא תמיד "גבוה יותר עדיף"

היה מפתה לתכנן מאיץ עם N_{ss} גבוה, כי משמעותו NPSHr נמוך, כלומר המשאבה "רעבה" לפחות עודף עומד ופחות מועדת לקוויטציה בנקודת העבודה. אבל יש מחיר. עין יניקה גדולה במיוחד (N_{ss} מעל 11,000 אמריקאי) מועדת לר-סירקולציה ביניקה (suction recirculation) כשעובדים מתחת ל-BEP, מערבולת חוזרת שמייצרת רעידות, רעש ובלאי, בדיוק כמו קוויטציה. לכן יצרנים מנוסים שומרים את N_{ss} בטווח מאוזן, 7,000–9,000 $\approx$ אמריקאי. גבוה מדי הוא לא תמיד טוב יותר. הנושא נפרש במלואו בפרק 15.

המהירות הסגולית ככלי בדיקת שפיות

נסכם בכלי המעשי שמהנדס משתמש בו יום-יום. עוד לפני שפותחים קטלוג כלשהו, חישוב מהירות סגולית של נקודת העבודה הנדרשת אומר מיד **איזה סוג משאבה לחפש**. אם חישבת n_q נמוך, חפש משאבה רדיאלית או רב-שלבית. אם קיבלת n_q גבוה, אתה בשטח של זרימה מעורבת או אקסיאלית. אם הסוג שאתה מחזיק בקטלוג לא תואם את ה- n_q שחישבת, משהו לא מסתדר, כנראה מהירות סיבוב לא נכונה, מספר דרגות שגוי, או יחידות מבולבלות.

1 קבע את נקודת העבודה הנדרשת

ספיקה Q ועומד H מהמתקן. אלה נתוני התכנון או נקודת ה-BEP שאתה מכוון אליה.

2 בחר מהירות סיבוב מועמדת

בישראל בדרך כלל 1450 או 2900 rpm (מנוע 4 או 2 קטבים, 50 Hz). מהירות גבוהה יותר מעלה את n_q .

3 חשב n_q

הצב בנוסחה 11.1 (זכור Q ב- m^3/s). אם העומד גבוה מאוד, נסה לחלק אותו למספר דרגות ולבדוק את n_q לדרגה.

4 סווג והצלב מול הקטלוג

השווה לטבלה 11.1. אם הסוג שיצא תואם את מה שזמין ובטווח נצילות בריא, התקדם. אם לא, שנה מהירות או מספר דרגות וחזור.

אז מה? מספר אחד מארגן את כל עולם המשאבות. מהירות סגולית קושרת בין הביצועים הנדרשים, צורת המאיץ, תלילות עקום ה-H-Q, כיוון עקום ההספק, דרישת ה-NPSH והנצילות המרבית האפשרית, הכול ממספר אחד שמחושב ב-BEP. שתי תובנות ללקיחה הביתה: ראשית, **תמיד ודא את מוסכמת היחידות** לפני שאתה משווה מספרי מהירות סגולית, כי N_s אמריקאי גדול פי 51.6 מ- n_q אירופי. שנית, **חשב n_q כבדיקת שפיות מהירה** לפני כל בחירת משאבה, הוא יגיד לך אם בכלל אתה מחפש את הסוג הנכון, ויחסוך לך שעות של חיפוש בקטלוג הלא נכון. מהירות סגולית היא לא סקרנות אקדמית, היא המצפן של הטקסונומיה כולה.

קישורים בספר

מהירות הסגולית הוזכרה לראשונה בהקשר צורת המאיץ בפרק 5. כאן היא הופכת לעמוד השדרה המארגן. בפרק 12 נצא מהרצף הזה אל המשפחות הממשיות, מ-end-suction ועד טורבינת תאים אנכית, וכל אחת תתיישב במקומה על סקאלת ה- h_q . עקומות המאפיין שכל משפחה מציירת, בפרק 13. חוקי הדמיות, שמסבירים מדוע h_q נשמרת קבועה תחת שינוי מהירות וקיצוץ, בפרק 14. מהירות הסגולית של יניקה ו-NPSH במלואם בפרק 15. בחירת משאבה שלמה לנקודת עבודה אמיתית בפרק 17.

12 משפחות המשאבות, אחת לאחת

Pump Families, One by One

בקצרה

כל המשאבות הצנטריפוגליות חולקות את אותו לב, מאיץ שמוסיף אנרגיה וגוף שממיר אותה ללחץ (פרק 5). אבל את אותו לב אורזים בעשרות דרכים שונות, כל אחת מותאמת לתפקיד אחר. **אותה פיזיקה, גוף שונה.** זה הפרק שבו לומדים לזהות כל משפחה במבט, ולדעת מתי כל אחת היא הבחירה הנכונה.

נעבור משפחה אחר משפחה, מ-**end-suction** הפשוטה שמוקנת מיליוני פעמים, דרך משאבת הקידוח ה**טבולה** שהיא לב שאיבת המים בישראל, ועד ה**אקסיאלית** שמזיזה נהר שלם בעומד של חצי מטר. לכל משפחה נראה את העיקרון, חתך סכמטי, יתרונות וחסרונות, יישומים ותקנים. בסוף נסכם בשתי טבלאות בחירה שמתרגמות נקודת עבודה אל המשפחה הנכונה. **זה רוחב היריעה של כל הספר, בפרק אחד.**

איך לקרוא את מפת המשפחות

לפני שצוללים לכל משפחה, כדאי להחזיק שלושה צירי חלוקה בראש. כל משאבה שתפגוש היא נקודה במרחב התלת-ממדי הזה, וברגע שמזהים את שלושת המספרים, המשפחה כמעט בוחרת את עצמה.

הציר הראשון הוא **מספר הדרגות**: חד-שלבית לעומד נמוך-בינוני, רב-שלבית לעומד גבוה, כי העומדים מתחברים בטור (פרק 5, נוסחה 5.2). הציר השני הוא **כיוון ההתקנה**: אופקית במשטח יבש ליד המים, אנכית בבור או בקידוח. הציר השלישי הוא **מיקום המנוע ביחס לנוזל**: יבש מעל פני הקרקע, או טבול מתחת למים. שלושת הצירים האלה, יחד עם **מהירות סגולית** ($specific\ speed, n_q$) מפרק 11 שקובעת את צורת המאיץ, מסבירים כמעט כל משאבה בעולם.

יניקת קצה *end-suction*

הנוזל נכנס אקסיאלית בקצה המשאבה (בקו הציר) ויוצא רדיאלית בצד. הסידור הפשוט והנפוץ ביותר.

גוף מפוצל *axially-split / split-case*

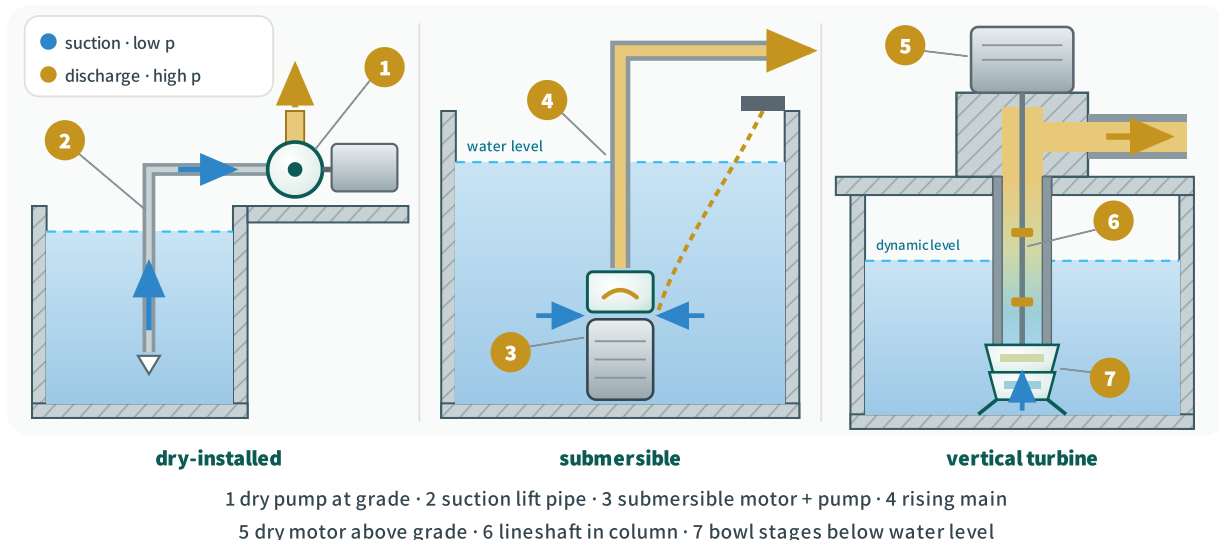
הגוף נחתך לאורך מישור הציר לשני חצאים, כך שאפשר להרים את המכסה ולגשת לרוטור בלי לגעת בצנרת.

משאבה טבולה *submersible*

המנוע עצמו טבול בנוזל, צמוד למאיצים, אטום הרמטית. אין ציר ארוך ואין מנוע יבש מעל פני הקרקע.

מעבר חופשי *free / solids passage*

קוטר הכדור הגדול ביותר שיכול לעבור דרך המאיץ והגוף בלי להיתקע. מדד המפתח למשאבות ביוב.



איור 12.1 · שלוש דרכי ההתקנה שמסבירות חצי מהטקסונומיה: dry-installed: המשאבה יבשה ליד המים, צינור יניקה יורד אל המקור. submersible: המנוע והמשאבה טבולים יחד מתחת למים, וקו עולה מרים את הנוזל. vertical turbine: המנוע יבש מעל פני הקרקע, ציר ארוך (lineshaft) מעביר את הכוח אל דרגות המאיצים הטבולות בתחתית. קידוד הצבע בכל הפרק: כחול = יניקה בלחץ נמוך, זהב = סניקה בלחץ גבוה. בטון חתוך מסומן בקווקוו.

סכמטי · להמחשת שלושת כיווני ההתקנה, לא בקנה מידה

למה דווקא עשר משפחות

אפשר לחתוך את עולם המשאבות הצנטריפוגליות לעשרות תת-סוגים, אבל בשטח חוזרות בעיקר עשר משפחות. השאר הם וריאציות עליהן. הסדר כאן אינו מקרי, הוא הולך מהפשוט והנפוץ (end-suction) אל המורכב והמיוחד (אקסיאלית), וקרוב לקרוב מבחינת שימוש: חד-שלביות אופקיות, אחר כך אנכיות וטבולות, אחר כך רב-שלביות לעומד גבוה, ולבסוף המקרים המיוחדים. אם תזכרו את העשר האלה, תזהו כמעט כל משאבה שתפגשו.

1. חד-שלבית יניקה-קצה (end-suction)

זו **סוסת העבודה של העולם**. כשמישהו אומר "משאבה צנטריפוגלית" בלי לפרט, סביר שזו end-suction חד-שלבית. הנוזל נכנס אקסיאלית דרך עין היניקה בקצה המשאבה, פוגש מאיץ חד-שלבי אחד, ויוצא רדיאלית כלפי מעלה או הצידה דרך גוף לשון (volute, פרק 5). פשוטה, זולה, אמינה, ומיוצרת במיליוני יחידות בכל גודל מ-0.5 kW ועד מאות קילואט.

היתרון התכנוני הגדול שלה הוא תצורת **משיכה אחורית** (back pull-out): גוף המשאבה נשאר מחובר לצנרת, ואת כל יחידת הרוטור, מאיץ, ציר, מסבים ואטם, מושכים החוצה לאחור יחד עם המנוע. אפשר לתקן אטם או להחליף מאיץ בלי לפרק אף צינור. זה מה שהפך אותה לתקן האחזקה של העולם.

שלוש תצורות מבנה לפי התקן

בתוך משפחת end-suction יש שלוש תצורות מבנה נפוצות, שמסומנות באותיות לפי המינוח האירופי (Europump, תקנה 547/2012). ההבדל ביניהן הוא **איך הצייר נתמך ואיך המנוע**

מחובר, וזה משפיע ישירות על המחיר, על האמינות ועל הנוחות בשטח.

1 ESOB · גוף עם מסבים משלו (own bearings)

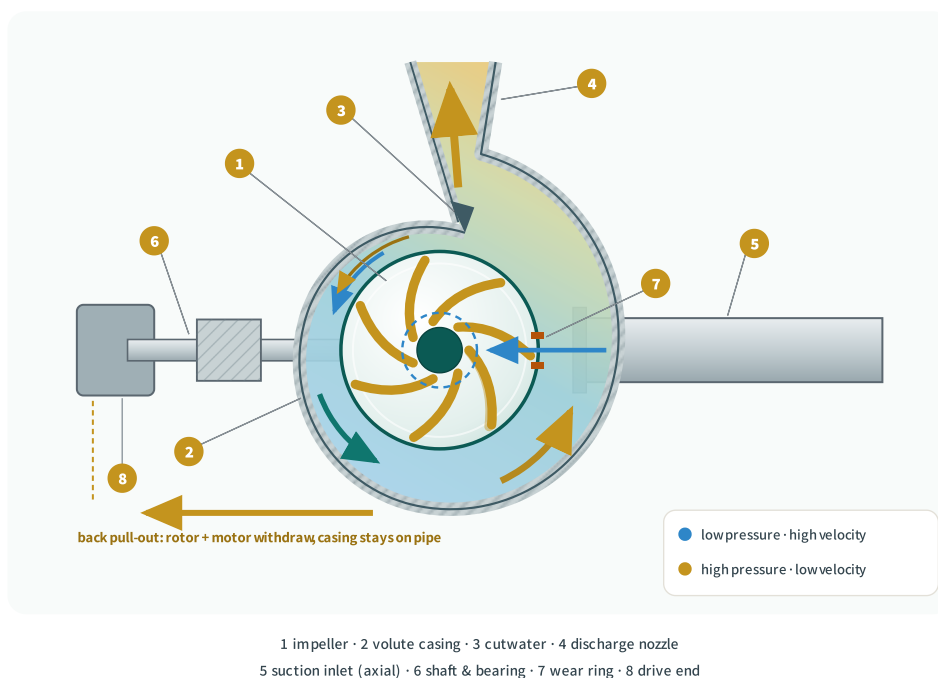
למשאבה מסבים משלה ותושבת נושאת, והמנוע מחובר במצמד; מצמד עם ציר ביניים (spacer) מאפשר משיכה אחורית בלי להזיז את המנוע. התצורה האמינה והנוחה ביותר לתחזוקה, כי הציר נתמך עצמאית. נפוצה בתחנות מים ובמערכות תעשייתיות. תקן ממדים EN 733.

2 ESCC · מצמד צמוד (close-coupled): המאיץ יושב על ציר המנוע המוארך, בלי מסבים נפרדים

ללא מצמד, ללא יישור וללא מסבים נפרדים למשאבה. הקומפקטיות והזולה ביותר. החיסרון: החלפת אטם דורשת פירוק המנוע, ובלאי מסב המנוע פוגע במשאבה. נפוצה בבוסטרים קטנים ובמערכות מבנים.

3 ESCCi · כמו ESCC אך בתצורת אינ-ליין (inline): יניקה וסניקה על ציר אחד

אותה תצורה צמודה, אבל היניקה והסניקה יושבות על קו צינור אחד והמשאבה מתיישבת בתוך הצנרת, לרוב אנכית. חוסכת מקום, ושכיחה במערכות סחרור והגברת לחץ במבנים.



איור 12.2 · חתך חזיתי של end-suction. הנוזל נכנס אקסידאלית דרך צינור היניקה (מימין) אל עין המאיץ, מואץ בלהבים הזהובים, ונאסף בגוף הלשון הספירלי שמתרחב לאורך הזרימה עד הסניקה הרדיאלית למעלה. קידוד הצבע הוא הפיזיקה: כחול = מהירות גבוהה ולחץ נמוך, זהב = הלחץ שנבנה. החץ הזהב למטה מראה את עיקרון ה-back pull-out: כל יחידת הרוטור והמנוע נשלפת בעוד הגוף נשאר מחובר לצנרת.

סכמטי · חתך אורך, לא בקנה מידה

end-suction • המגבלות

- **עומד מוגבל** • דרגה אחת, בדרך כלל עד כ-100–90 m.
- **דחף צירי לא מאוזן** • חד-יניקה, צריך חורי איזון (פרק 8).
- **NPSH בינוני** • עין יניקה אחת, רגישה יותר מדו-יניקה.
- **ספיקה מוגבלת** • לספיקות ענק עוברים ל-split-case.

end-suction • היתרונות

- **פשוטה וזולה** • המבנה הבסיסי ביותר, מחיר רכישה ואחזקה נמוך.
- **back pull-out** • אחזקת הרוטור בלי לגעת בצנרת.
- **זמינות וחלפים** • תקן עולמי, חלקים בכל מקום.
- **טווח גדלים עצום** • מבוסס קטנטן ועד מאות קילוואט.

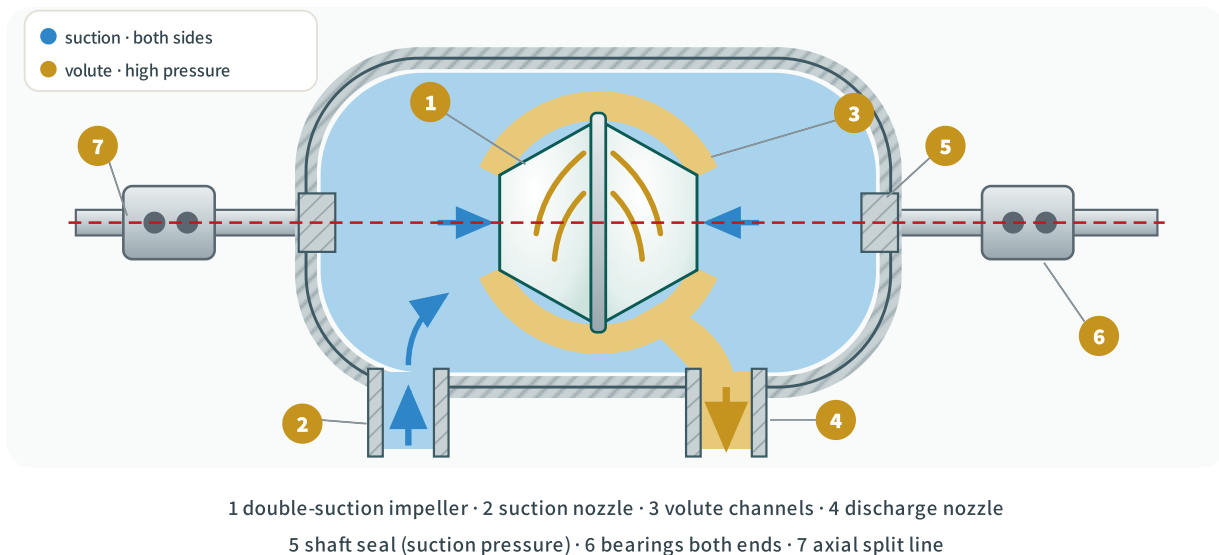
יישומים טיפוסיים • ותקנים

יישום: הגברת לחץ במים נקיים, בוסטרים, מיזוג אוויר (מים קרים/חמים), העברת נוזלים בתעשייה, השקיה, וכל מקום שדורש פתרון פשוט וכלכלי בעומד וספיקה מתונים. **תקנים:** EN 733 (ממדים והספק נומינלי למשאבות מים כלליות, "norm pumps"), ISO 2858 (ממדים לתעשייה הכימית; המקבילה האמריקאית ASME B73.1), ו-ISO 5199 (דרישות טכניות ואמינות לתצורה תעשייתית). חתימת המבנה: ES0B / ESCC / ESCCi.

2. גוף מפוצל אופקי / דו-יניקה (split-case)

כשצריך להזרים הרבה מאוד מים בעומד בינוני, זו המשאבה. הגוף מפוצל לאורך מישור אופקי שעובר דרך ציר הסיבוב, כך שהמכסה העליון מורם כספר ונחשף כל הרוטור בלי לפרק את הצנרת או את המנוע. בליבה יושב **מאיץ דו-יניקה** (*double-suction impeller*), שבנוי כמו שני מאיצים גב אל גב על אותו טבור, והנוזל נכנס אליו משני הצדדים בו-זמנית.

הסידור הדו-יניקתי משיג שלושה דברים בבת אחת. ראשית, **הדחף הצירי כמעט מתבטל** כי הלחץ סימטרי משני הצדדים (פרק 8). שנית, אותה ספיקה מתחלקת לשתי עיני יניקה, מהירות הכניסה יורדת, ולכן **NPSH הנדרש נמוך מאוד** (פרק 15), יתרון קריטי בשאיבה ממאגרים פתוחים. שלישית, שטח הכניסה הכפול מאפשר **ספיקות עצומות** בנצילות גבוהה. בישראל זו המשאבה הקלאסית של תחנות ההזנה הראשיות, קווי ההולכה ומערכות כיבוי אש גדולות.



איור 12.3 · מבט מלמעלה על מישור הפיצול. המים הכחולים (לחץ יניקה) ממלאים את הגוף ומזינים את מאיץ הדו-יניקה משני צדדיו בו-זמנית, ולכן הדחף הצירי מתקזז כמעט לחלוטין. תעלות הלשון הזהובות (לחץ גבוה) אוספות את הזרימה מהיקף המאיץ אל פיית הסניקה. קו הפיצול האדום עובר דרך הציר: הרמת המכסה חושפת את כל הרוטור בלי לגעת בצנרת או במנוע, והאטמים יושבים בלחץ היניקה הנמוך.

סכמטי · מבט מלמעלה על מישור הפיצול, לא בקנה מידה

split-case · המחיר

- גדולה ויקרה · גוף מורכב, תופסת שטח אופקי רב.
- שני אטמי ציר · הציר חוצה את הגוף בשני קצותיו (פרק 7).
- עומד מוגבל · בדרך כלל חד-שלבית, לא ללחצים גבוהים מאוד.
- רגישה ליישור · ציר ארוך נתמך בשני קצוות.

split-case · היתרונות

- ספיקות גבוהות מאוד · שטח כניסה כפול.
- דחף צירי מאוזן · סימטריה דו-יניקתית, מסבים שמחזיקים שנים.
- NPSH נדרש נמוך · מצוין לשאיבה ממאגר פתוח.
- אחזקה נוחה · מרימים מכסה, לא מפרקים צנרת.

יישומים טיפוסיים · ותקנים

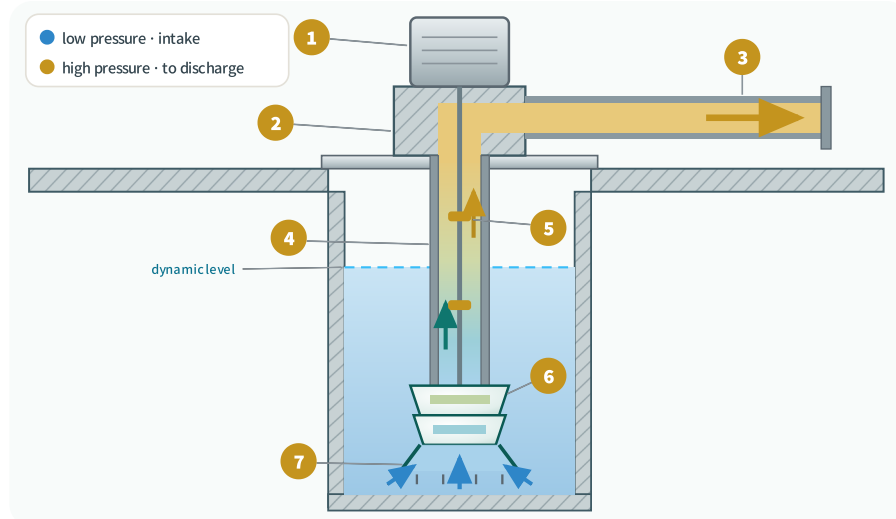
יישום: תחנות הזנה ראשיות של ערים ותאגידי מים, קווי הולכה מגוף מים מרכזי, מערכות כיבוי אש בנפח גבוה, מערכות קירור תעשייתיות גדולות, ותחנות שאיבה ממאגרים פתוחים שבהן NPSH הוא אילוף. **תקנים:** API 610 (סיווג BB1) ביישומים תעשייתיים תובעניים, ו-NFPA 20 במערכות כיבוי אש. עקרון איזון הדחף הצירי שלה נדון בפרק 8, וה-NPSH הנמוך בפרק 15.

3 · טורבינה אנכית עם ציר ארוך (vertical turbine, lineshaft)

כשמקור המים נמצא עמוק מתחת לרגליים, בבור רטוב, בבריכת שאיבה או בקידוח, והרצון הוא לשמור את המנוע יבש ונגיש מעל פני הקרקע, נכנסת לתמונה ה-**טורבינה האנכית** (vertical turbine pump, VTP). המנוע האנכי יושב על משטח מעל הבור, ו

ציר ארוך (lineshaft) יורד דרך עמודת ההזרמה אל מקבץ דרגות מאיצים בתחתית, ה**תאים (bowls)**.

כל תא הוא דרגה: מאיץ קטן בתוך גוף מפזר (diffuser, פרק 5), והם מולבשים זה על זה כך שהעומדים מתחברים בטור (פרק 5, נוסחה 5.2). מוסיפים תאים, מוסיפים עומד. המאיצים תמיד טבולים מתחת למפלס המים הדינמי, ולכן המשאבה מתחילה לפעול ללא תיחול (היא תמיד "מוצפת"). הציר הארוך נתמך לאורכו במסבים מרווחים, ויכול להיות מסוכך ומשומן (oil-lubricated, enclosed) או פתוח ומשומן-מים (water-lubricated, open).



1 dry motor · 2 discharge head · 3 discharge pipe · 4 column pipe
5 lineshaft & bearings · 6 bowl stages · 7 suction bell & strainer

איור 12.4 · טורבינה אנכית עם ציר ארוך. המנוע יבש מעל פני הקרקע, ה-lineshaft יורד דרך עמודת ההזרמה, נתמך לאורכו במסבים מרווחים (זהב), ומניע את מקבץ התאים (bowls) הטבולים מתחת למפלס המים הדינמי. כל תא הוא דרגה אחת, והעומדים מתחברים בטור: שימו לב איך צבע המים בעמודה נודד מכחול בכניסה לזהב בראש, הלחץ נבנה דרגה אחר דרגה בדרך למעלה.

סכמטי · חתך אנכי, לא בקנה מידה

טורבינה אנכית · המגבלות

- ציר ארוך ועדין · יישור ומסבי ציר קריטיים (פרק 8).
- אחזקה כבדה · להגיע לתאים צריך להוציא את כל הטור.
- מסבי ציר נשחקים · במים מלוכלכים, בלאי מואץ.
- עלות התקנה גבוהה · מבנה ארוך ומורכב.

טורבינה אנכית · היתרונות

- מנוע יבש ונגיש · קל לתחזק ולקרר, לא טבול.
- עומד גבוה · מוסיפים תאים, מוסיפים דרגות.
- תופסת מעט שטח · אנכית, רגל קרקע קטנה.
- תמיד מוצפת · המאיצים טבולים, אין צורך בתיחול.

יישום: שאיבה מבורות רטובים ומבריקות שאיבה עמוקות, הזנת מים ממאגר תת-קרקעי, מערכות עיבוי וקירור בתחנות כוח, ושאבת מי ים להתפלה. כשהקידוח צר מאוד או עמוק מאוד, מעדיפים את הגרסה הטבולה (משפחה 4) שמוותרת על הציר הארוך. **תקנים:** AWWA E103 (מפרט אמריקני לטורבינות אנכיות), VS6 / VS1 API 610 ביישומים תעשייתיים, ו-ISO 9906 לבדיקת הביצועים.

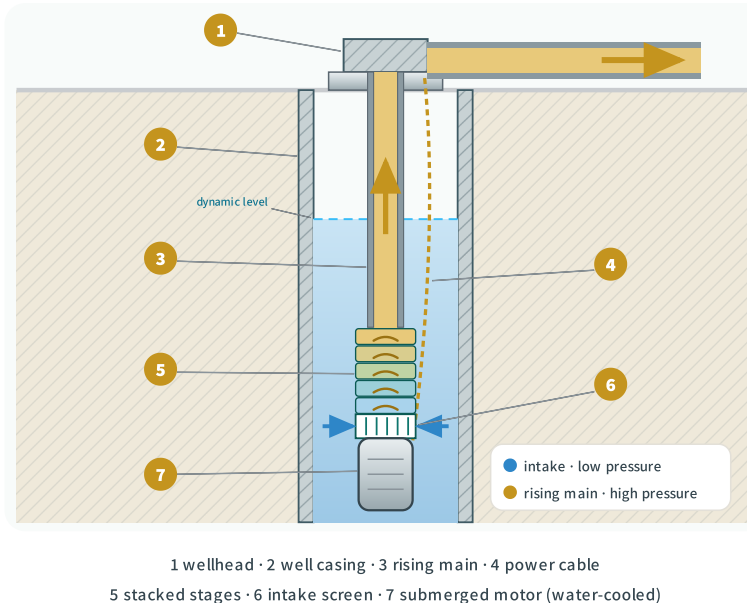
4 • משאבת קידוח טבולה (submersible borehole)

זו **המשאבה של מים בישראל**. רוב מי השתייה והחקלאות בארץ נשאבים מקידוחים עמוקים, ובתחתית כל קידוח כזה יושבת משאבה צנטריפוגלית רב-שלבית צרה וארוכה, צמודה למנוע חשמלי **טבול** שאטום הרמטית ומקורר על ידי המים שזורמים סביבו. אין ציר ארוך, אין מנוע יבש מעל הקרקע. כל היחידה, מנוע ומאיצים, תלויה על קצה קו ההזרמה (rising main) עמוק בתוך הקידוח.

המבנה הוא גליל דק בקוטר של ארבעה עד שמונה אינץ', כדי להתאים לקוטר הצינור של הקידוח. המנוע בתחתית (סדר הפוך מהטורבינה האנכית), מעליו מקבץ דרגות מאיצים זעירים מולבשים בטור, ובראש קו ההזרמה. כל דרגה מוסיפה עומד, וקידוחים עמוקים דורשים עשרות דרגות כדי להרים מים ממאות מטרים. כבל חשמל אטום למים יורד לאורך הקו ומזין את המנוע.

למה דווקא טבולה ולמה זה חשוב כל כך בישראל

אקוויפר ההר, אקוויפר החוף והקידוחים בערבה ובגליל מספקים חלק ניכר ממי המדינה, ורבים מהם עמוקים מ-150 m. ציר ארוך מנוע-עליון בקידוח כזה היה כבד, יקר וקשה ליישור. הפתרון הוא להוריד את המנוע עצמו למטה, טבול. היתרון: אין ציר ארוך, אין בעיית יישור, והמנוע מקורר טבעית. החיסרון הגדול: **כשל מנוע משמעו הוצאת כל הטור מהקידוח**, מבצע יקר עם מנוף. לכן אמינות, NPSH ובדיקת נצילות תקופתית (פרק 25) הם קריטיים דווקא כאן.



איור 12.5 · משאבת קידוח טבולה בתוך דיפון הקידוח. סדר ההרכבה הפוך מהטורבינה האנכית: ה-motor האטום בתחתית, מעליו מקבץ הדרגות שצבען מתחמם מכחול לזהב ככל שהלחץ נבנה, והנוזל נכנס דרך מסנן ה-intake שביניהם ועולה בקו ההזרמה הזהוב. כבל החשמל המקווקו יורד לאורך הקו. אין ציר ארוך, והמנוע מקורר על ידי המים שזורמים סביבו.

סכמטי · חתך אנכי בקידוח, לא בקנה מידה

קידוח טבולה · המגבלות

- **אחזקה יקרה** · כל כשל = הוצאת הטור במנוף.
- **מנוע טבול פגיע** · חדירת מים = שריפת ליפופים.
- **רגישה לחול** · חול שוחק מאיצים ומסבים.
- **NPSH ומפלס דינמי** · ירידת מפלס בקיץ מסכנת קוויטציה.

קידוח טבולה · היתרונות

- **קידוחים עמוקים מאוד** · עשרות דרגות, מאות מטרים.
- **אין ציר ארוך** · ללא בעיות יישור ומסבי ביניים.
- **קוטר צר** · נכנסת לצינור קידוח רגיל.
- **שקטה ונסתרת** · אין מנוע רועש מעל הקרקע.

יישומים טיפוסיים · ותקנים

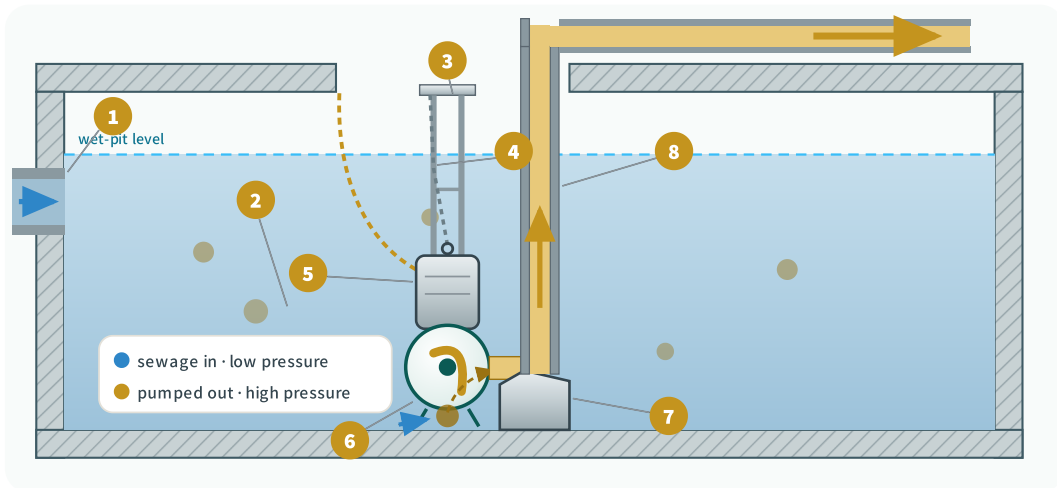
יישום: הפקת מי שתייה והשקיה מקידוחים עמוקים (לב שאיבת המים בישראל), הורדת מפלס מי תהום באתרי בנייה, שאיבה מבארות חקלאיות. **תקנים:** NEMA / IEC 60034 למנוע הטבול, ממדי קוטר לפי תקן 8 / 6 / 4 אינץ', ובדיקת ביצועים לפי ISO 9906 Grade 2, שהיא בדיוק בדיקת הנצילות התקופתית שמשרד האנרגיה דורש (פרק 25). הסף הרגולטורי למשאבת קידוח: $\eta \geq 55\%$ נצילות כוללת (פרק 25).

5. טבולה לניקוז ולביוב (drainage & sewage)

שאיבת שפכים, מי גשם ובוצה היא עולם שונה לחלוטין. כאן הסכנה אינה נצילות נמוכה אלא **סתירה**: סמרטוט, מגבונים לחים או גוש סיבים שנתקעים בין הלהבים ועוצרים את המשאבה. לכן משאבת הביוב הטבולה בנויה סביב עקרון אחד, **מעבר חופשי גדול**, ומקריבה למענו נצילות. המנוע טבול וצמוד למאיץ בתוך גוף אטום, והמשאבה כולה מורדת לתוך בריכת

השאיבה הרטובה (wet pit) על מסילות הכוונה, כך שאפשר להרים אותה בכבל בלי לרדת לבריכה.

סוג המאיץ נבחר לפי גסות המוצקים שבזרם, וזהו המשך ישיר של מאיצי הביוב מפרק 5: **תעלה** (channel) לנצילות יחסית גבוהה בשפכים עירוניים, **להב יחיד** (single-vane) למעבר ענק וכמעט בלתי-נסתם, **מערבולת** (vortex) לבוצה סיבית ושוחקת, ו**טוחן** (grinder) שמרסק את המוצקים לפני שאיבה דרך קו לחץ דק. הכלל הברזל: ודא שהמעבר החופשי גדול מהמוצק הגדול ביותר שצפוי בזרם, ורק אז דאג לנצילות.



1 inflow sewer · 2 solids in the flow · 3 guide rails · 4 lifting chain & cable
5 submersible motor · 6 single-vane impeller, free passage · 7 auto-coupling · 8 discharge riser

איור 12.6 · משאבת ביוב טבולה בבריכה רטובה. המנוע והמאיץ טבולים בתוך גוף אטום, המשאבה יושבת על חיבור-אוטומטי (auto-coupling) בתחתית ומורדת על מסילות הכוונה (guide rails) כדי שאפשר יהיה להרים אותה בשרשרת בלי לרדת לבריכה. המאיץ החד-להבי נבחר למעבר חופשי גדול: החץ החום המקווקו מראה מוצק שעובר בשלמותו דרך המאיץ אל קו הסניקה הזהוב שמטפס ויוצא מעל פני הקרקע.

סכמטי · חתך בריכת שאיבה, לא בקנה מידה

ביוב טבולה · המחיר

- נצילות נמוכה · vortex יורד ל-40–55%.
- אטם פגיע · אטם מכני כפול חשוף לשפכים.
- בלאי שוחק · חול וסיבים אוכלים את המאיץ.
- חירום בסתימה · תחנה שנסתמת = הצפת רחוב.

ביוב טבולה · היתרונות

- עמידות בסתימה · מעבר חופשי גדול.
- התקנה רטובה נוחה · מסילות הכוונה + auto-coupling.
- אין צורך בתיחול · המשאבה טבולה ומוצפת.
- שקטה · המנוע טבול, בולע רעש.

יישום: תחנות הרמת שפכים עירוניות, ניקוז מי גשם והצפות, שאיבת בוצה ושפכים תעשייתיים, ייבוש בורות וחפירות. **תקנים:** EN 12050 (תחנות הרמת שפכים), ISO 9906 לבדיקת ביצועים, ודירוג מנוע אטום-טבול IP68. בחירת המאיץ (channel / single-vane / vortex / grinder) נדונה במלואה בפרק 5. עיקרון הברזל: אמינות לפני נצילות, ואז נצילות בתוך מה שהאמינות מתירה.

6. רב-שלבית אופקית, ring-section ו-barrel

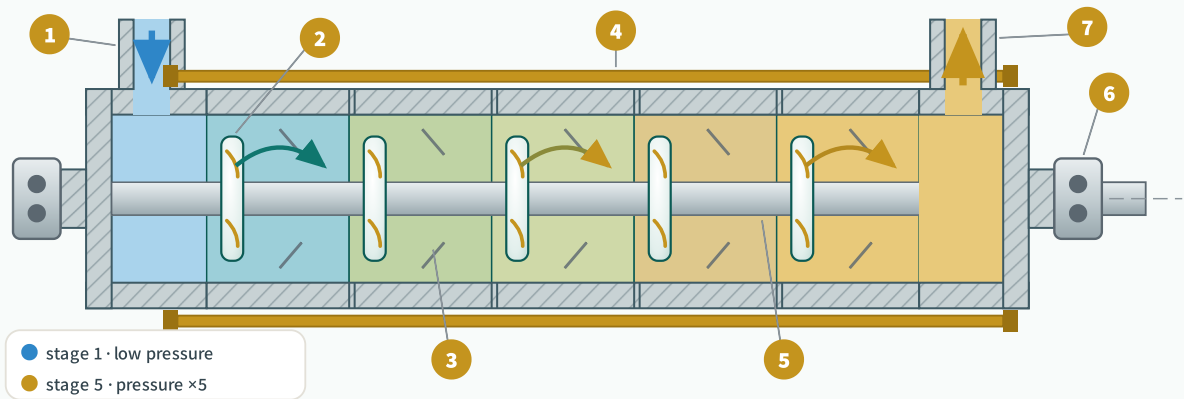
כשצריך **עומד גבוה מאוד**, מאות מטרים או עשרות אטמוספרות, מאיץ אחד לא מספיק. הפתרון הוא לחבר דרגות רבות בטור על ציר אופקי אחד, בדיוק כמו בטורבינה האנכית, אבל בשכיבה ועם מנוע יבש רגיל. כל דרגה היא מאיץ בתוך גוף מפזר, והעומדים מצטברים: עשר דרגות של 40 m כל אחת נותנות 400 m עומד. שתי תצורות מבנה עיקריות, שנבדלות באופן שבו הגוף סוגר על הדרגות.

segmental ring-section / מקטעית

הדרגות מולבשות זו על זו כטבעות-מקטע, וכל מקטע הוא חתיכת גוף עצמאית. מהדקים את כל הטור עם ברגי-מתיחה אורכיים שמחזיקים את הכול יחד כמו שרשרת חוליות. פתרון כלכלי וקומפקטי לעומדים גבוהים, אבל פירוק הגוף דורש שחרור הברגים ופירוק כל הטור, ולכן האחזקה כרוכה בעבודה.

barrel / double-casing (חבית / גוף כפול)

כל מקבץ הדרגות נכלא בתוך **גוף לחץ חיצוני** (*outer barrel*) אחד מוצק, כמו חבית. הגוף הפנימי נושא את ההידראוליקה, והחבית החיצונית סופגת את כל לחץ העבודה ומאפשרת לשלוף את החבילה הפנימית מהקצה בלי לפרק את הצנרת. זו התצורה לעומדים ולחצים הקיצוניים ביותר, ולתקני הבטיחות התובעניים ביותר (התפלה בלחץ גבוה, הזנת דודים בתחנות כוח).



1 suction branch · 2 impeller (one per stage) · 3 diffuser · 4 tie bolts
5 shaft · 6 bearings & seals both ends · 7 discharge branch

איור 12.7 · משאבה רב-שלבית מסוג ring-section בחתך אורך. חמש דרגות בטור על ציר אחד, כל דרגה היא מאיץ + מפזר בתוך טבעת-מקטע עצמאית, וכל הטור מהודק בברגי-המתיחה הזהובים. צבע המים מתחמם מכחול בכניסה לזהב בסניקה: הלחץ מטפס דרגה אחר דרגה, הספיקה זהה בכולן. בתצורת barrel כל הטור הזה נכלא בתוך גוף לחץ חיצוני אחד.

סכמטי · חתך אורך, לא בקנה מידה

רב-שלבית אופקית · המחיר

- יקרה ומורכבת · דרגות רבות, ייצור מדויק.
- דחף צירי מצטבר · צריך תוף או דיסק איזון (פרק 8).
- רגישה ל-NPSH · דרגה ראשונה קריטית.
- אחזקת ring-section · פירוק כל הטור.

רב-שלבית אופקית · היתרונות

- עומד גבוה מאוד · מאות מטרים, עשרות אטמוספרות.
- נצילות גבוהה · מפזר סימטרי, עומס רדיאלי נמוך.
- barrel ללחצים קיצוניים · גוף חיצוני סופג לחץ.
- שליפה מהקצה · בגרסת barrel, בלי פירוק צנרת.

יישומים טיפוסיים · ותקנים

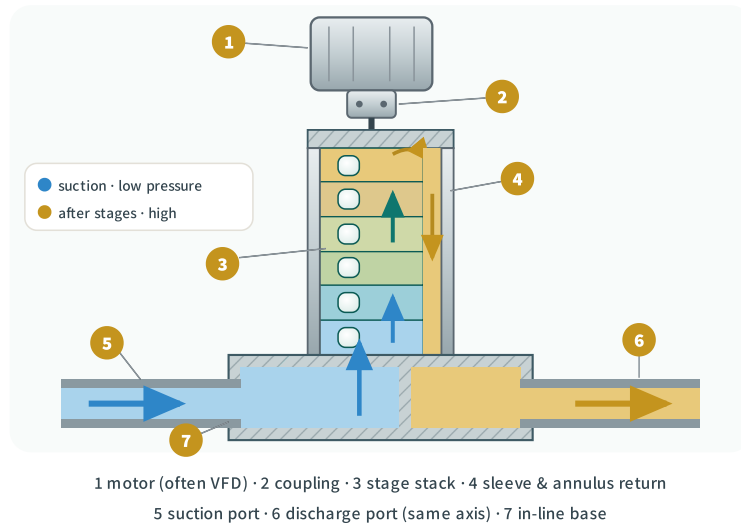
יישום: הזנת דודי קיטור בתחנות כוח (boiler feed), התפלה בלחץ גבוה (high-pressure RO), הזרקת מים בקווי הולכה ארוכים, מערכות לחץ גבוה בתעשייה. **תקנים:** API 610 (feed), ISO 5199 (ring-section) / BB4 (ring-section) / BB5 (barrel) ביישומי נפט וגז ותחנות כוח, בתעשייה כללית. עיקרון חיבור הדרגות בטור והדחף הצירי המצטבר נדונים בפרקים 5 ו-8.

7. רב-שלבית אנכית אינ-ליין (vertical multistage in-line)

קחו את העיקרון של הרב-שלבית, סובבו אותו לאנכי, והכניסו את היניקה והסניקה לאותו ציר אופקי בבסיס, וקיבלתם את הרב-שלבית האנכית האינ-ליין (vertical multistage in-line). זו עמודה אנכית דקה ואלגנטית: מנוע בראש, מקבץ דרגות באמצע, ובסיס עם אוגני יניקה וסניקה באותו קו. היא מתחברת ישירות לצנרת אופקית כמו אביזר, תופסת רגל קרקע זעירה, ומספקת עומד גבוה בספיקה מתונה. זו המשאבה ששינתה את עולם הבוסטרים והעלאת הלחץ.

הקומפקטיות באה מהאנכיות: במקום טור אופקי ארוך, הדרגות מולבשות לגובה. בזכות הבסיס האינ-ליין אפשר להחליף משאבה קיימת בלי לשנות את הצנרת, ובזכות המבנה האנכי כמה

משאבות כאלה תופסות שטח קטן בחדר משאבות. בגרסאות מודרניות, מנוע עם **ממיר תדר (VFD)** מובנה הופך כל יחידה ל-booster set חכם שמווסת לחץ קבוע (פרק 21).



איור 12.8 · רב-שלבית אנכית אינ-ליין. היניקה והסניקה יושבות על אותו ציר אופקי בבסיס (in-line base), כך שהמשאבה מתחברת ישירות לצנרת קיימת. המים מטפסים דרך מקבץ הדרגות שצבעו מתחמם מכחול לזהב, מסתובבים בראש העמודה, ויורדים זהובים במעטפת החיצונית אל פיית הסניקה. המנוע בראש, לעיתים קרובות עם VFD מובנה. רגל קרקע זעירה, עומד גבוה בספיקה מתונה.

סכמטי · חתך אנכי, לא בקנה מידה

אנכית אינ-ליין · המגבלות

- ספיקה מתונה · לא לספיקות ענק.
- מים נקיים בלבד · דרגות צרות נסתמות.
- גובה · עמודה גבוהה דורשת תקרה מתאימה.
- אחזקה לגובה · הוצאת חבילת הדרגות מלמעלה.

אנכית אינ-ליין · היתרונות

- רגל קרקע זעירה · אנכית, חוסכת מקום.
- חיבור אינ-ליין · ישירות על הצנרת, החלפה קלה.
- עומד גבוה · דרגות רבות בעמודה אחת.
- booster חכם · VFD מובנה ללחץ קבוע.

יישומים טיפוסיים · ותקנים

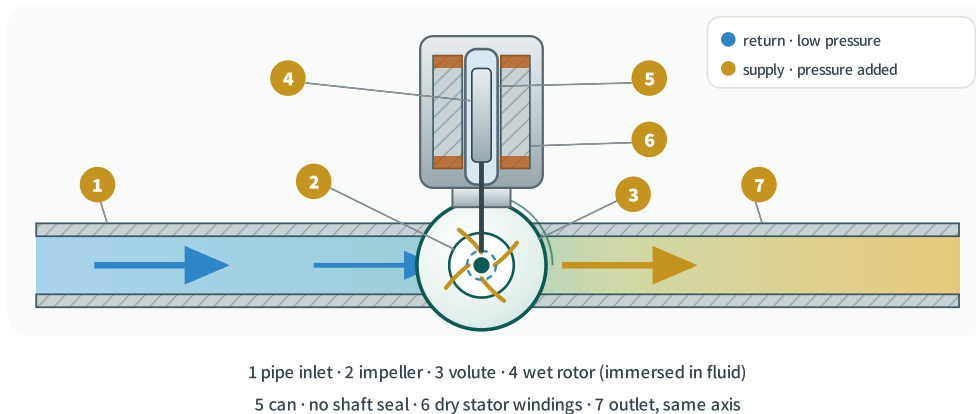
יישום: ערכות הגברת לחץ (booster sets) בבנייני מגורים ומשרדים, הזנת מים בקומות גבוהות, מערכות השקיה בלחץ, סינון וטיהור מים, ומערכות לחץ קבוע מבוקרות-VFD. **תקנים:** EN 809 (בטיחות משאבות), ISO 9906 לביצועים. כלל בחירה: כשצריך עומד גבוה בספיקה קטנה-בינונית ובמקום מצומצם, האנכית האינ-ליין כמעט תמיד מנצחת end-suction.

8 · אינ-ליין צמוד-מצמד וסחרורי בניין (close-coupled circulators)

המשפחה הקטנה והשקטה שמסתתרת בכל בניין. **סחרור (circulator)** הוא משאבה צנטריפוגלית זעירה צמודת-מצמד שמותקנת ישירות על הצינור כמו אביזר, ותפקידה לא להרים מים אלא **להזיז אותם במעגל סגור**: מים חמים למערכת חימום, מים קרים למערכת

מיזוג, מי תהליך בלולאה. מכיוון שהמעגל סגור, היא אינה צריכה להתגבר על עומד סטטי, רק על חיכוך הצנרת, ולכן עובדת בעומד נמוך מאוד ובספיקה מתונה.

שתי תצורות עיקריות. **הסחרור הרטוב** (*wet-rotor / glandless*) טובל את רוטור המנוע עצמו בנוזל הנשאב, מבטל לחלוטין את הצורך באטם ציר, ופועל בשקט מוחלט ובלי אחזקה כמעט, מושלם לבתים. **הסחרור היבש** (*dry-rotor / glanded*) שומר את המנוע יבש מאחורי אטם, נצילתו גבוהה יותר, והוא משמש במערכות מסחריות גדולות. גרסאות מודרניות עם VFD מובנה (high-efficiency ECM motor) חוסכות אנרגיה דרמטית במערכות חימום.



איור 12.9 · סחרור אינ-ליין בחתך. המשאבה יושבת ישירות על הצינור האופקי, היניקה והסניקה על אותו ציר, וצבע המים מתחמם קלות מכחול לזהב, רק תוספת הלחץ שמכסה את חיכוך המעגל הסגור. למעלה: מחסנית ה-wet-rotor בחתך, הרוטור טבול בנוזל הנשאב בתוך שרוול דק (can) שמפריד אותו מליפופי הסטטור היבשים, ולכן אין כלל אטם ציר ואין רעש.

סכמטי · חתך, לא בקנה מידה

סחרור אינ-ליין · המגבלות

- עומד נמוך בלבד · לא להרמת מים.
- מים נקיים · רגיש לחלקיקים ואבנית.
- **wet-rotor פחות נצילות** · על חשבון השקט.
- **ספיקה מוגבלת** · לא לזרימות גדולות.

סחרור אינ-ליין · היתרונות

- קומפקטי וקל להתקנה · ישירות על הצינור.
- **wet-rotor: ללא אטם** · כמעט בלי אחזקה, שקט מוחלט.
- **חיסכון עם ECM/VFD** · ויסות לעומס משתנה.
- **זול בעומד נמוך** · מושלם למעגל סגור.

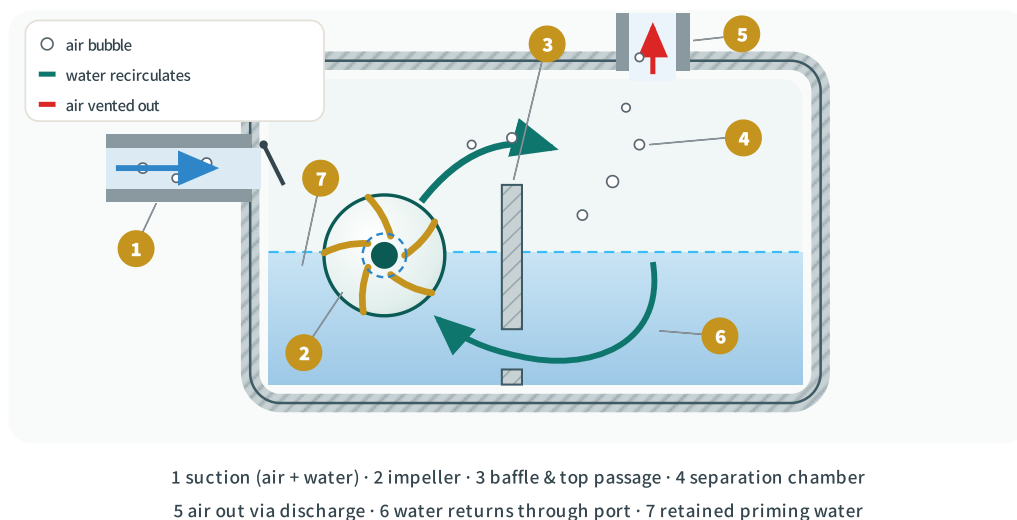
יישומים טיפוסיים · ותקנים

יישום: סחרור מים במערכות חימום ביתיות ומסחריות, הזרמת מים קרים במערכות מיזוג (HVAC), לולאות מי תהליך וקירור, ושירותי בניין. **תקנים:** EN 16297 (תקנת ה-EEI (Energy Efficiency Index) של האיחוד האירופי שמחייבת משאבות סחרור מודרניות בנצילות גבוהה, EN 809 לבטיחות. כלל ההבחנה: סחרור לא מתגבר על עומד סטטי, רק על חיכוך, ולכן עובד בעומד נמוך מאוד לעומת בוסטר אמיתי.

9. משאבה עם הצפה עצמית (self-priming)

למשאבה צנטריפוגלית רגילה יש חולשה מולדת: היא **לא יכולה לשאוב אוויר**. אם צינור היניקה מלא מלא אוויר, המאיץ מסתובב בריק ולא יוצר ואקום מספיק כדי למשוך מים מלמטה. לכן משאבה רגילה מעל מפלס המים חייבת מילוי ידני (priming) לפני כל הפעלה, או מערכת ואקום נפרדת. **המשאבה עם הצפה עצמית (self-priming)** פותרת זאת בחוכמה הידראולית: היא מפנה את האוויר בעצמה ומתחילה לשאוב, גם כשהיא ניצבת מעל המים.

הסוד הוא **תא ההצפה (priming chamber)**, מאגר מים פנימי שנשאר מלא בין הפעלות. כשהמשאבה מתחילה, המאיץ מערבב את האוויר מצינור היניקה עם המים שבתא ויוצר תרחיף אוויר-מים. התרחיף נזרק לתא הסניקה, שם האוויר משתחרר ועולה החוצה והמים הכבדים נופלים בחזרה אל תא ההצפה. כל סבב מפנה עוד אוויר מצינור היניקה, עד שהצינור מלא מים והמשאבה "תפסה". התהליך לוקח שניות עד דקות, תלוי באורך וגובה היניקה.



איור 12.10 · עקרון ההצפה העצמית בחתך. תא ההצפה שומר מים בין הפעלות (הקו המקווקו הוא מפלס המים הכלוא). המאיץ מערבב את האוויר מצינור היניקה עם המים וזורק את התרחיף מעל המחיצה הפנימית אל תא ההפרדה; שם בועות האוויר הלבנות עולות ומשתחררות דרך הסניקה (חץ אדום), והמים הכבדים צוללים וחוזרים אל המאיץ דרך פתח ההחזרה התחתון (חץ טורקיז). כל סבב מפנה עוד אוויר עד שהמשאבה "תופסת".

סכמטי · להמחשת מחזור ההצפה, לא בקנה מידה

הצפה עצמית · המחיר

- **נצילות נמוכה יותר** · תא ההצפה וההחזר עולים אנרגיה.
- **גוף גדול** · נפח פנימי לתא המים.
- **גובה יניקה מוגבל** · עד כ-7-8 מעשית.
- **צריך מים בתא** · אם התרוקן, לא תתפוס.

הצפה עצמית · היתרונות

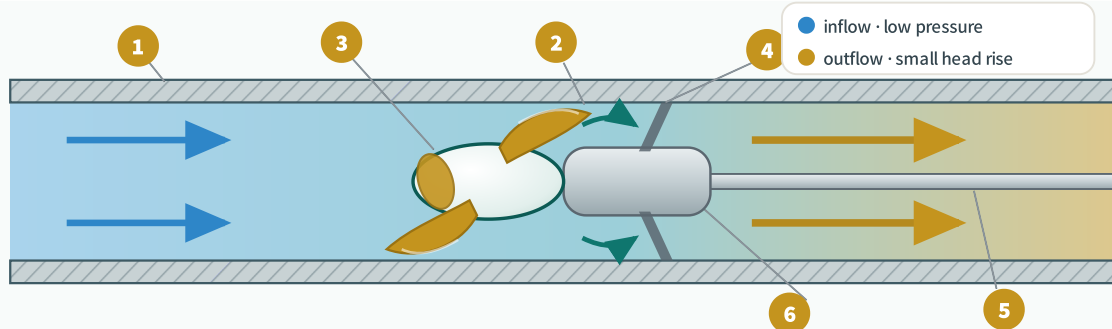
- **אין מילוי ידני** · מתחילה לבד מעל המים.
- **סובלת אוויר** · עמידה בכיסי אוויר ושאיבה לסירוגין.
- **ניידת** · מצוין למשאבות נייד ולשטח.
- **פשוטה לתפעול** · אין מערכת ואקום נפרדת.

יישום: משאבות נידוד וחירום, ייבוש בורות והצפות, ביוב קל ומי שטח, שאיבה ממאגרים פתוחים שבהם המשאבה ניצבת מעל מפלס המים ואי אפשר להציף אותה, ומערכות חקלאיות עונתיות. **תקנים:** ISO 5199 / ISO 9905 לדרישות מבנה, ISO 9906 לביצועים. הקשר ל-NPSH: גובה היניקה המעשי של self-priming מוגבל בדיוק על ידי אותם שיקולי לחץ אדים ועליית יניקה מפרק 15.

10 • אקסיאלית / פרופלר (axial-flow)

בקצה השני של רצף מהירות הסגולית (פרק 11) יושבת ה**משאבה האקסיאלית** (*axial-flow / propeller pump*), ההפך הגמור מהבוסטר. כאן המאיץ אינו "זורק" את הנוזל החוצה רדיאלית, אלא **דוחף אותו קדימה לאורך הציר** כמו פרופלר סירה. אין כמעט סחרור והמרת מהירות ללחץ. הנוזל פשוט נדחף קדימה. התוצאה: **ספיקה עצומה בעומד נמוך מאוד**, לעיתים חצי מטר עד כמה מטרים בלבד, אבל בקצב של אלפי מטרים מעוקבים בשעה.

מהירות סגולית גבוהה מאוד ($n_q > 150$) מכתיבה את הצורה: מאיץ רחב עם מעט להבים מעוותים, יחס $D_2/D_1 \approx 1$, וגוף צינורי כמעט ישר. כשהעומד הנדרש מעט גבוה מהאקסיאלית הטהור אבל עדיין נמוך מאוד, עוברים ל**זרימה מעורבת** (*mixed-flow*), ביניים בין הרדיאלי לאקסיאלי, שמשלב דחיפה קדימה עם מעט סחרור. רבות מהאקסיאליות מותקנות אנכית בתעלה או בבור כמשאבת פרופלר.



1 tubular casing · 2 twisted propeller blade · 3 hub · 4 outlet guide vanes
5 drive shaft · 6 vane-bearing fairing · flow passes straight through

איור 12.11 • משאבה אקסיאלית בחתך. המאיץ הוא פרופלר עם מעט להבים מעוותים על טבור (hub) בתוך גוף צינורי, ולהבי ההכוונה הקבועים שאחריהם מיישרים את הסחרור הקל שמקנה הרוטור. הנוזל נדחף קדימה לאורך הציר, וצבעו מתחמם רק מעט מכחול לזהב: ספיקה עצומה, תוספת עומד קטנה. זו צורת המאיץ של מהירות סגולית גבוהה מאוד (פרק 11).

סכמטי • חתך צינורי, לא בקנה מידה

אקסיאלית - היתרונות

- ספיקה ענקית - אלפי m^3/h בעומד נמוך.
- נצילות גבוהה בתחומה - במהירות סגולית גבוהה.
- גוף פשוט וקומפקטי - צינור כמעט ישר.
- להבים מתכווננים - בגרסאות גדולות, לוויסות ספיקה.

אקסיאלית - המגבלות

- עומד נמוך מאוד - לא להרמת לחץ.
- הספק קופץ בעומד סגירה - הפוך מרדיאלית (פרק 13).
- רגישות ל-NPSH - מהירות כניסה גבוהה.
- טווח עבודה צר - רגישות לסטייה מ-BEP.

שימו לב להפך בעקום ההספק

במשאבה רדיאלית רגילה, ההספק נמוך בעומד סגירה ועולה עם הספיקה (פרק 13). באקסיאלית זה הפוך: ההספק מקסימלי בעומד סגירה ויורד עם הספיקה. המשמעות המעשית: **אסור להתניע אקסיאלית נגד ברז סגור**, כי המנוע יימשך לעומס שיא ועלול להישרף. תמיד מתניעים אקסיאלית כשמסלול היציאה פתוח. זה אחד ההבדלים החשובים ביותר בין משפחות, והוא נובע ישירות מצורת העקום (פרק 13).

יישומים טיפוסיים - ותקנים

יישום: ניקוז ושלילת הצפות (תחנות שאיבת נחלים ומאגרים), השקיה בנפחים גדולים בעומד נמוך, מי קירור בתחנות כוח ובתעשייה כבדה, מערכות העברת מים בין מאגרים. **תקנים:** ISO 9906 לביצועים, API 610 VS3 לתצורות תעשייתיות. בישראל, נפוצה בתחנות ניקוז ובמערכות קירור גדולות. הזרימה המעורבת (mixed-flow) מכסה את התווח בין האקסיאלית הטהורה לבין הרדיאלית.

סייד-בר - מתי משאבת נפח-חיובי מנצחת

כל עשר המשפחות עד כה הן **צנטריפוגליות**: הן מאיצות נוזל וממירות מהירות ללחץ. אבל יש משפחה אחרת לגמרי של משאבות, ה**נפח-חיובי** (*positive displacement, PD*), שלוכדת נפח קבוע של נוזל ודוחפת אותו קדימה בכוח מכני: בוכנה, בורג, גלגלי שיניים, סרעפת או צינור גמיש. הספר הזה צנטריפוגלי בלבד, אבל מהנדס טוב חייב לדעת מתי לעצור ולבחור PD במקום.

תכונה	צנטריפוגלית	נפח-חיובי (PD)
קשר ספיקה-עומד	ספיקה יורדת כשעומד עולה (עקום)	ספיקה קבועה כמעט, ללא תלות בעומד
לחץ אפשרי	מוגבל לכל דרגה, מערימים דרגות	גבוה מאוד, מוגבל רק בחוזק הגוף
נוזל צמיג	נצילות צונחת מהר עם הצמיגות	מצוין, אדיש כמעט לצמיגות
ספיקה נמוכה ומדויקת	בעייתית, נצילות נמוכה	מצוין, מינון מדויק (dosing)
עומד סגירה (ברז סגור)	בטוח לזמן קצר (חימום בהמשך, פרק 13), מסתחרר במקום	מסוכן, הלחץ מזנק עד פיצוץ, חובה שסתום בטיחות
ספיקה גבוהה	מצוין, חוזק המשפחה	חלש, יקר ומסורבל

מתי לעבור ל-PD • ולמה הספר צנטריפוגלי

בחר **נפח-חיובי** כש: (1) הלחץ גבוה במיוחד וצריך מעט נוזל, (2) הספיקה זעירה ומדויקת, למשל מינון כימיקלים, (3) הנוזל צמיג מאוד, שמן כבד או בוצה סמיכה, או (4) צריך ספיקה קבועה ללא תלות בלחץ. אבל לעולם המים והאנרגיה, שבו צריך **ספיקות גדולות בעומד סביר**, מים, ביוב, השקיה, קירור, המשאבה הצנטריפוגלית כמעט תמיד מנצחת: זולה יותר, פשוטה יותר, אמינה יותר, ובטוחה בעומד סגירה. לכן הספר הזה מתמקד בה לחלוטין, ומזכיר את ה-PD רק כדי שתדע מתי לעצור ולקרוא לקטגוריה אחרת.

לתרגם נקודת עבודה למשפחה: שתי טבלאות בחירה

נסכם את כל הפרק לכלי עבודה. הטבלה הראשונה היא **מטריצת בחירה**: היא לוקחת תפקיד (טווח ספיקה, טווח עומד, סוג נוזל, מקום התקנה) ומחזירה את המשפחה המומלצת. זו נקודת הפתיחה של כל בחירת משאבה, לפני שיורדים לדגם ולעקום הספציפי בפרק 17.

טבלה 12.2 • מטריצת בחירת משפחה לפי תפקיד (כלי עבודה)

תפקיד / נקודת עבודה	ספיקה	עומד	נוזל / מקום	משפחה מומלצת
הגברת לחץ, מים נקיים	נמוכה- בינונית	נמוך- בינוני	נקי, יבש	1 · end-suction
הזנת עיר, קו הולכה ראשי	גבוהה מאוד	בינוני	נקי, מאגר פתוח	2 · split-case
שאיבה מבור / בריכה	בינונית-גבוהה	גבוה	נקי, בור רטוב	3 · טורבינה אנכית
הפקת מים מקידוח עמוק	בינונית	גבוה מאוד	נקי, קידוח צר	4 · טבולה קידוח
תחנת הרמת שפכים	בינונית	נמוך- בינוני	מוצקים, בריכה	5 · טבולה ביוב
הזנת דוד / התפלה	נמוכה- בינונית	גבוה מאוד	נקי, לחץ גבוה	6 · רב-שלבית אופקית
booster בניין / לחץ קבוע	נמוכה- בינונית	גבוה	נקי, מקום מצומצם	7 · אנכית אינ-ליין
סחרור חימום / מיזוג	מתונה	נמוך מאוד	נקי, מעגל סגור	8 · סחרור אינ-ליין
ניוד / ייבוש מעל המים	בינונית	נמוך- בינוני	מים+אוויר, נייד	9 · הצפה עצמית
ניקוז / קירור בנפח	גבוהה מאוד	נמוך	נקי, תעלה/בור	10 · אקסיאלית

הטבלה השנייה מצמידה לכל משפחה את התקנים המנהלים שלה, כדי שתדע למה לצפות במפרט ובהזמנה. תקנים אלה קובעים ממדים, דרישות אמינות ושיטת בדיקה, ולכן הם השפה המשותפת בין המתכנן, היצרן והרגולטור.

טבלה 12.3 • משפחה מול תקנים מנהלים

משפחה	תקני מבנה / ממדים	בדיקת ביצועים
1 · end-suction	EN 733 · ISO 2858 · ISO 5199	ISO 9906
2 · split-case	API 610 (BB1) · NFPA 20	ISO 9906
3 · טורבינה אנכית	AWWA E103 · API 610 (VS1/VS6)	ISO 9906
4 · טבולה קידוח	IEC 60034 (מנוע) · inch-4/6/8	ISO 9906 Grade 2
5 · טבולה ביוב	EN 12050 · IP68	ISO 9906
6 · רב-שלבית	API 610 (BB4/BB5) · ISO 5199	ISO 9906
7 · אנכית אינ-ליין	EN 809 · ISO 5199	ISO 9906
8 · סחרור אינ-ליין	EN 16297 (EEI) · EN 809	ISO 9906
9 · הצפה עצמית	ISO 9905 / ISO 5199	ISO 9906
10 · אקסיאלית	API 610 (VS3)	ISO 9906

החוט המקשר: ISO 9906 לכולן

שימו לב לעמודה השמאלית בטבלה 12.3: **כל המשפחות, ללא יוצא מן הכלל, נבדקות לפי ISO 9906**. תקני המבנה משתנים ממשפחה למשפחה, אבל שיטת מדידת הביצועים, ספיקה, עומד, הספק ונצילות, אחת היא לכולן. זה בדיוק התקן שמשרד האנרגיה בישראל דורש בבדיקת הנצילות התקופתית (Grade 2), ולכן אותה מתודולוגיה מודדת משאבת קידוח טבולה, סחרור בניין ואקסיאלית של ניקוז. הפיזיקה אחת, התקן אחד, רק הגוף משתנה.

PD

מתי לעצור
לחץ/צמיגות/מינון

1

תקן ביצועים
ISO 9906 לכולן

3

צירי חלוקה
דרגות · התקנה · מנוע

10

משפחות מרכזיות
אותה פיזיקה

אז מה? אותו לב, עשרה גופים. מ-end-suction הפשוטה ועד האקסיאלית שמזיזה נהר, כל המשפחות הן וריאציות על המאיץ והגוף שלמדנו בפרק 5, פרושות לאורך רצף מהירות הסגולית של פרק 11. בחירת המשפחה היא תמיד הצעד הראשון בבחירת משאבה: קודם קוראים את שלושת המספרים, ספיקה, עומד ומקום, ומצמידים אותם למשפחה דרך מטריצת הבחירה (טבלה 12.2). רק אחר כך יורדים לדגם, לעקום ולנקודת העבודה הספציפית. וכשמשוהו נשמע לא נכון, משאבת קידוח במבנה end-suction, או אקסיאלית שמתניעים נגד ברז סגור, חזרו לכאן: לרוב הבעיה היא משפחה שלא תואמת את התפקיד.

קישורים בספר

המאיץ והגוף שכל המשפחות בנויות סביבם בפרק 5. הדחף הצירי שמשפחות חד-יניקה ורב-שלביות חייבות לאזן בפרק 8. מהירות הסגולית שמסבירה את צורת המאיץ של כל משפחה, מהבוסטר ועד האקסיאלית, בפרק 11. צורת עקום ההספק שמסבירה למה אקסיאלית מסוכנת בעומד סגירה בפרק 13. NPSH שקריטי בקידוח טבול ובמאגר פתוח בפרק 15. בחירת המשאבה השלמה לנקודת עבודה אמיתית, ההמשך הישיר של מטריצת הבחירה, בפרק 17. שיקולי התקנה אנכית, טבולה ובור בפרק 23.



חלק חמישי

ביצועים, עקומות וחוקי דמיות

Performance, Characteristic Curves & Similarity

עקומות מאפיין 13

חוקי הדמיות, חיתוך מאיץ ומהירות סגולית 14

NPSH וקוויטציה 15

13 עקומות מאפייין

Characteristic Curves

בקצרה

משאבה צנטריפוגלית אינה נותנת ספיקה אחת קבועה. היא מציעה **עקום** שלם של אפשרויות: ככל שהעומד שהיא צריכה להתגבר עליו עולה, הספיקה שהיא מספקת יורדת. כל אישיותה דחוסה לתוך ארבע עקומות שהיצרן מצייר על אותו ציר ספיקה: **עומד** (H-Q), **נצילות** (η-Q), **הספק** (P-Q) ו-**NPSH נדרש** (NPSHr-Q).

קריאת עקום יצרן היא המיומנות הבסיסית ביותר בעולם המשאבות, ומיומנות שאי אפשר לדלג עליה. כל בחירה, כל אבחון תקלה וכל חישוב חיסכון מתחילים מהיכולת להסתכל על דף אחד ולקרוא ממנו ספיקה, עומד, נצילות, הספק ו-NPSH בנקודת העבודה. בפרק נלמד לקרוא את כל ארבע העקומות, להבין את נקודת העבודה המיטבית ואת טווחי העבודה סביבה, ולפענח למה צורת העקום, תלולה או שטוחה, קובעת אם המשאבה מתאימה ליישום.

מבט-על: ארבע עקומות על דף אחד

ברגע שלומדים לקרוא את ארבע העקומות, המשאבה מפסיקה להיות קופסה שחורה והופכת למכשיר שאפשר לחזות את התנהגותו בכל נקודת עבודה.

הציר האופקי של כל גיליון נתונים של יצרן הוא תמיד אחד: **הספיקה** (Q , flow rate), ביחידות m^3/h או L/s . עליו מורכבות ארבע עקומות, לעיתים על צירים אנכיים נפרדים זה מעל זה, אך תמיד מעל אותו ציר ספיקה משותף. הרעיון הגאוני הוא שכל המידע על המשאבה, בכל ספיקה אפשרית, נמצא בעמודה אנכית אחת מעל הספיקה הנתונה. בוחרים ספיקה על הציר התחתון, מטפסים אנכית, וקוראים את כל ארבעת הגדלים שהמשאבה תספק שם.

זו הסיבה ש"נקודת עבודה" אינה נקודה על המשאבה, אלא נקודה על העקום. אותה משאבה בדיוק יכולה לעבוד ב- $30 m^3/h$ ולתת עומד גבוה, או ב- $60 m^3/h$ ולתת עומד נמוך. מה שקובע איפה היא תנחת בפועל הוא **עקום המערכת** שהיא מחוברת אליו, נושא שנפגוש בפרק 16. בינתיים, נלמד לקרוא את עקום המשאבה עצמו.

עקום עומד-ספיקה $head-flow\ curve\ (H-Q)$

העקום הראשי מתאר את העומד שהמשאבה מסוגלת לייצר בכל ספיקה. תמיד יורד ככל שהספיקה גדלה: יותר ספיקה, פחות עומד.

נקודת עבודה מיטבית $Best\ Efficiency\ Point\ (BEP)$

הספיקה שבה הנצילות מגיעה לשיא. הנקודה הבריאה, השקטה והחסכונית ביותר על העקום. עוגן לכל בחירה ולכל אבחון.

עומד בספיקה אפס $shut-off\ head$

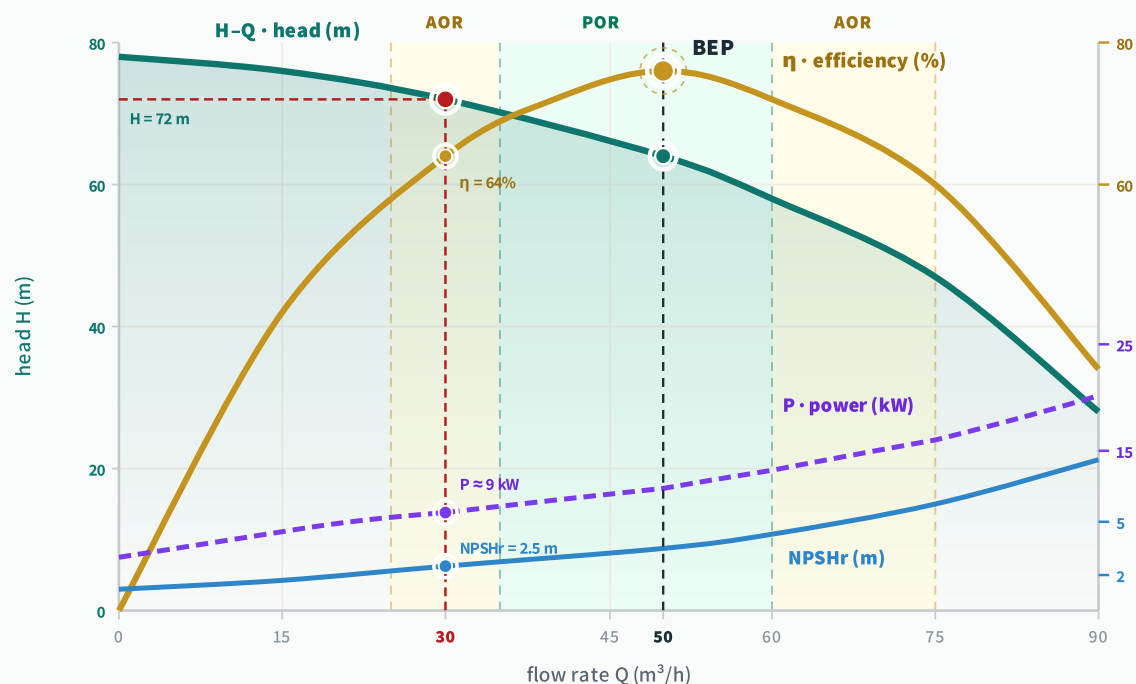
העומד שהמשאבה מייצרת כשהמוצא חסום לחלוטין (ספיקה אפס). הנקודה הגבוהה ביותר של עקום ה-H-Q, בקצה העליון של ציר העומד, בספיקה אפס.

עקום NPSH נדרש $NPSHr\ curve$

כמה עודף עומד יניקה המשאבה דורשת בכל ספיקה כדי לא להיכנס לקוויטציה. עולה עם הספיקה. מפורט במלואו בפרק 15.

העקום המלא: גיליון הביצועים של היצרן

האיור הבא הוא הלב של הפרק כולו, גיליון ביצועים מלא ומוער של משאבה אחת. ארבע העקומות מורכבות על ציר ספיקה משותף, לכל אחת סולם אנכי משלה בצבעה. סומנו עליו נקודת העבודה המיטבית, טווחי העבודה המומלצים, וקווי קריאה מנקודת עבודה לדוגמה. שווה להשקיע בו דקה ולעקוב אחרי כל עקום בנפרד.



איור 13.1 · גיליון ביצועים מלא של משאבה אחת, ארבע עקומות מעל ציר ספיקה משותף. עקום העומד H-Q (טורקיז, עם מילוי) יורד; הנצילות η (זהב) מטפסת לשיא ב-BEP (העיגול המוזהב בהילה); ההספק P (סגול מקווקו) וה-NPSHr (כחול) עולים עם הספיקה. הסולמות הצבעוניים בקצה הימני שייכים כל אחד לעקום בצבעו. הפס הירוק הוא טווח העבודה המועדף (POR) והצהבהב סביבו הטווח המותר (AOR). הקווים האדומים המקווקווים מדגימים את הקריאה של דוגמה 13.1: בספיקה $30 m^3/h$ מטפסים אנכית וקוראים $H = 72 m$, $\eta = 64\%$, $P \approx 9 kW$, $NPSHr = 2.5 m$.

סכמטי · משאבה אופיינית, BEP ב- $50 m^3/h$, להמחשת הקריאה

ארבע העקומות, אחת אחת

נצלול עכשיו לכל עקום בנפרד, נבין מה הוא מספר ומה הוא מסגיר על בריאות המשאבה. שלוש מהן (נצילות, הספק, NPSHr) פחות מוכרות למתחיל, אבל כל אחת מהן היא כלי אבחון בפני עצמה.

עקום העומד-ספיקה (H-Q)

העקום הראשי, ולרוב היחיד שמתחילים מסתכלים עליו. הוא יורד תמיד ככל שהספיקה גדלה: כשמבקשים מהמשאבה לספק ספיקה גדולה יותר, היא מסוגלת להתגבר על עומד נמוך יותר. הקצה השמאלי, ספיקה אפס, הוא **העומד בספיקה אפס** (*shut-off head*), העומד המקסימלי שהמשאבה מסוגלת לייצר כשהברז סגור לחלוטין. הקצה הימני הוא הספיקה המקסימלית, כשהעומד צונח. צורת ירידת העקום, תלולה או שטוחה, היא נושא מרכזי שנחזור אליו בהמשך הפרק.

עקום הנצילות (η -Q)

בניגוד ל-H-Q, עקום הנצילות אינו מונוטוני אלא **גבעה**. הוא מתחיל באפס בספיקה אפס (כל ההספק הולך לאיבוד, אין זרימה מועילה), מטפס לשיא, ויורד שוב בספיקות גבוהות. שיא

הגבעה הוא הנקודת עבודה מיטבית (BEP), הנקודה החשובה ביותר על כל הגיליון. שם המשאבה ממירה את החלק הגדול ביותר מהחשמל שהיא צורכת לעבודה הידראולית מועילה, ושם, לא במקרה, היא גם הכי שקטה והכי בריאה מבחינה מכנית. בעקום יצרן מוצגת בדרך כלל נצילות המשאבה (pump efficiency), ביחס להספק על הציר; את הנצילות הכוללת חשמל-מים (wire-to-water), שקובעת את חשבון החשמל ואת הסף הרגולטורי, מקבלים לאחר הכפלה בנצילות המנוע (פרק 25).

עקום ההספק (P-Q)

עקום ההספק מתאר כמה חשמל המשאבה צורכת בכל ספיקה. עבור רוב המשאבות הצנטריפוגליות (מהירות סגולית נמוכה עד בינונית, פרק 11) הוא עולה עם הספיקה: יותר ספיקה, יותר הספק. לכך יש משמעות מעשית חשובה, שמנוע שמותנע נגד ברז סגור (ספיקה אפס) צורך הספק נמוך, ולכן התנעה נגד מוצא חסום היא דווקא ההתנעה הקלה ביותר למנוע. במשאבות בעלות מהירות סגולית גבוהה מאוד (זרימה אקסיאלית, פרופלר) המגמה מתהפכת וההספק דווקא יורד עם הספיקה. תמיד שווה לבדוק את כיוון עקום ההספק לפני שמתכננים את ההגנה החשמלית של המנוע.

עקום ה-NPSH הנדרש (NPSHr-Q)

העקום הרביעי, שנמצא לרוב בתחתית הגיליון, הוא ה-NPSH הנדרש (NPSHr). הוא אומר כמה עודף עומד יניקה המשאבה דורשת בכל ספיקה כדי לא להיכנס לקוויטציה. הוא עולה עם הספיקה, ולכן דווקא בספיקות גבוהות סכנת הקוויטציה הגדולה ביותר. כאן רק נציין את קיומו ואת מגמתו, כי הוא נושא לפרק שלם, פרק 15, שמסביר איך משווים אותו ל-NPSH הזמין שהמתקן מספק.

טבלה 13.1 • מה כל עקום מספר למהנדס ומה לחפש בו

עקום	מגמה מול Q	מה הוא מספר	על מה לשים לב
H-Q · עומד	יורד	איזה עומד המשאבה תיתן בכל ספיקה	עומד בספיקה אפס, תלילות העקום, חיתוך מול עקום המערכת
Q-η · נצילות	גבעה (שיא ב-BEP)	כמה חשמל הופך לעבודה מועילה	גובה השיא, מיקום ה-BEP, רוחב הגבעה (כמה היא סלחנית)
P-Q · הספק	עולה (לרוב)	כמה kW המנוע ימשוך בכל ספיקה	הספק מקסימלי לבחירת מנוע, כיוון העקום להגנת ההתנעה
NPSHr	עולה	כמה עודף יניקה המשאבה דורשת	שמירת מרווח מול NPSH הזמין, החמרה בספיקה גבוהה (פרק 15)

נקודת העבודה המיטבית וטווחי העבודה

נקודת ה-BEP אינה רק שיא נצילות, היא נקודת שיווי המשקל ההידראולי של המשאבה. שם הזרימה נכנסת למאיץ ויוצאת ממנו בזוויות שתוכננו עבורה, ולכן אין מערבולות מיותרות, אין הלם בכניסה ללהבים, ועומס הדחף הרדיאלי על הציר מינימלי (ראו פרק 8). ככל שמתרחקים

מ-BEP לשני הכיוונים, התיאום נשבר: הזרימה פוגעת בלהבים בזווית שגויה, נוצרות מערבולות, הרעידות עולות והבלאי מואץ. לכן היצרנים מסמנים סביב ה-BEP שני טווחי עבודה.

טווח עבודה מועדף (Preferred Operating Region (POR) ·

בערך 70%–120% מספיקת ה-BEP. בתוכו המשאבה עובדת ברוגע, בנצילות גבוהה, ברעידות נמוכות ובאורך חיים מלא. כאן צריכה נקודת העבודה ליפול.

טווח עבודה מותר (Allowable Operating Region (AOR) ·

רחב יותר מה-POR, נקבע על ידי היצרן לכל דגם. בתוכו מותר לעבוד, אך לא לאורך זמן ולא כברירת מחדל. עבודה מחוץ ל-AOR מקצרת חיים באופן ניכר.

מה קורה משמאל ל-POR (ספיקה נמוכה מדי)

כשמשיניקים את המשאבה לספיקה נמוכה בהרבה מ-BEP, נכנסים לתחום מסוכן. שלוש תופעות מתרחשות יחד:

סכנות העבודה בספיקה נמוכה

- **רה-סירקולציה (recirculation)** · בספיקה נמוכה חלק מהנוזל מסתחרר בחזרה בכניסה וביציאה של המאיץ במקום לזרום קדימה. המערבולות החוזרות האלה אלימות, יוצרות אזורי לחץ נמוך ובוועות אדים ושוחקות את המאיץ, תופעה שמזכירה קוויטציה אך מקורה בספיקה הנמוכה.
- **דחף רדיאלי מקסימלי** · כפי שראינו בפרק 8, הדחף הרדיאלי על הציר מזנק ככל שמתרחקים מ-BEP, ובעומד הסגירה הוא מקסימלי. הציר מתכופף הצידה, האטם נשחק והמסב נשרף.
- **חימום הנוזל** · כמעט כל ההספק הופך לחום במקום לזרימה. בעומד סגירה ממושך הנוזל הכלוא במשאבה יכול לרתוח ולהרוס את האטם והמאיץ תוך דקות.

מה קורה מימין ל-POR (ספיקה גבוהה מדי)

בקצה הימני של העקום, בספיקות גבוהות מ-BEP, הסכנות שונות אך לא פחות אמיתיות. שתי בעיות עיקריות:

ספיקה גבוהה מדי • הסכנות

- **קריסת מרווח NPSH** • עקום ה-NPSHr עולה בחדות בספיקה גבוהה בדיוק כשה-NPSH הזמין יורד. שני העקומים נעים זה לקראת זה והמשאבה נכנסת לקוויטציה (פרק 15).
- **עומס יתר על המנוע** • כיוון שעקום ההספק עולה עם הספיקה, עבודה רחוק מימין מושכת הספק גבוה מהנקוב, והמנוע מתחמם ועלול לקפוץ על ההגנה התרמית.
- **דחף רדיאלי מנוגד** • הדחף חוזר וגדל, רק בכיוון ההפוך לזה של הספיקה הנמוכה, ושוב מכופף את הציר.

בתוך ה-POR • התגמול

- **נצילות מקסימלית** • החשבון החשמלי הנמוך ביותר לכל מ"ק שנשאב.
- **רעידות מינימליות** • הזרימה חלקה, אין הלם כניסה ואין מערבולות חוזרות.
- **אורך חיים מלא** • מסבים, אטמים וטבעות שחיקה מחזיקים שנים.
- **מרווח NPSH בריא** • רחוק מסף הקוויטציה.

הכלל המעשי שמכתיב כל בחירה

אל תבחר משאבה שנקודת העבודה שלך נופלת בקצה הימני או השמאלי של העקום. הטעות הנפוצה ביותר היא **כרית ביטחון מוגזמת**: מהנדס בוחר משאבה גדולה "ליתר ביטחון", ואז מחנק אותה בשסתום לספיקה הדרושה. התוצאה היא נקודת עבודה רחוקה משמאל ל-BEP, עם נצילות נמוכה, רעידות גבוהות ובלאי מואץ, בדיוק ההפך מ"ביטחון". בבחירה (פרק 17) המטרה תמיד אחת: שנקודת העבודה תיפול בתוך ה-POR, קרוב ככל האפשר ל-BEP, לא רחוק ממנו.

נתון גיליון הביצועים של המשאבה מאיור 13.1. ה-BEP שלה ב- $50 \text{ m}^3/\text{h}$. מערכת מסוימת מחייבת את המשאבה לעבוד בעומד של 72 m . נקרא מהעקום את כל הגדלים בנקודה הזו, ונבדוק אם זו נקודת עבודה בריאה.

(דרישת המערכת) $H_{\text{duty}} = 72 \text{ m}$ $Q_{\text{BEP}} = 50 \text{ m}^3/\text{h}$ (להמרת הספק) $\eta_{\text{motor}} = 0.92$

1 מאתרים את העומד $H = 72 \text{ m}$ על ציר ה-H ויורדים אופקית עד שפוגעים

בעקום ה-H-Q (טורקיז), ומשם אנכית אל ציר הספיקה: $Q \approx 30 \text{ m}^3/\text{h}$

2 מאותה ספיקה $Q = 30 \text{ m}^3/\text{h}$ מטפסים אנכית ופוגעים בעקום הנצילות (זהב):

$\eta \approx 64\%$

3 באותה אנך פוגעים בעקום ההספק (סגול) וקוראים: $P \approx 9 \text{ kW}$ (ואכן:

$P = Q \cdot H / (367 \cdot \eta) = 30 \cdot 72 / (367 \cdot 0.64) \approx 9.2 \text{ kW}$)

4 הספק חשמלי נמשך מהרשת:

$P_1 = P / \eta_{\text{motor}} = 9.2 / 0.92 \approx 10 \text{ kW}$

5 וכן בעקום ה-NPSHr (כחול): $NPSHr \approx 2.5 \text{ m}$

6 בודקים את היחס לספיקת ה-BEP: $Q/Q_{\text{BEP}} = 30 / 50 = 0.60$

קריאה: בעומד 72 m המשאבה תספק $Q \approx 30 \text{ m}^3/\text{h}$ בנצילות $\approx 64\%$, תמשוך 9 kW על הציר ($P_1 \approx 10 \text{ kW}$ מהרשת) ותדרוש $NPSHr \approx 2.5 \text{ m}$. הכל מדף אחד, בלי שום מדידה בשטח.

אבל האם זו נקודת עבודה טובה? היחס $Q/Q_{\text{BEP}} = 0.60$ מציב אותנו מתחת לגבול השמאלי של ה-POR (שמתחיל ב-70%), בתוך ה-AOR בלבד. הנצילות כבר ירדה מ-76% בשיא ל-64%, וכל ירידה נוספת בספיקה תכניס אותנו לתחום הרה-סירקולציה והדחף הרדיאלי.

מסקנה: $Q/Q_{\text{BEP}} = 0.60$ נמצא מחוץ לטווח המומלץ, מתחת לקצהו התחתון. המשאבה גדולה מדי ליישום הזה. בבחירה מחדש כדאי לחפש דגם קטן יותר שה-BEP שלו קרוב ל- $30 \text{ m}^3/\text{h}$, כדי לעבוד בליבת ה-POR ובנצילות הגבוהה ביותר.

הלקח: קריאת העקום אינה רק שליפת מספרים. ברגע שקראת את הנצילות ואת היחס Q/Q_{BEP} , אתה כבר יודע אם בחרת נכון או שבחרת משאבה גדולה מדי שתבזבז חשמל ותישחק מהר.

עקום תלול מול עקום שטוח

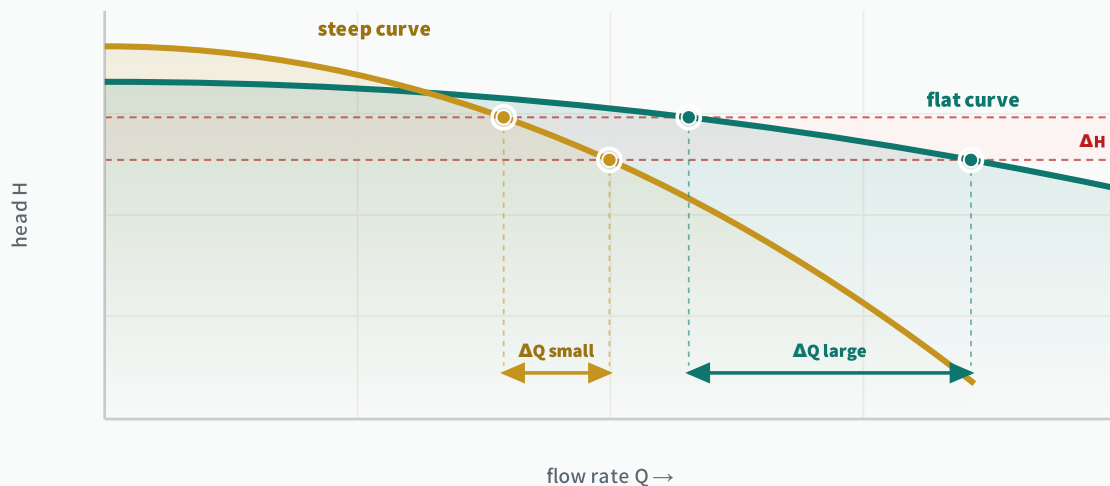
צורת ירידת עקום ה-H-Q אינה פרט אסתטי, היא קובעת את אופי המשאבה ואת התאמתה ליישום. מבחינים בין שני קצוות.

עקום שטוח (flat curve)

עקום שטוח יורד מעט בלבד לאורך כל טווח הספיקות. המשמעות: שינוי גדול בספיקה גורר שינוי קטן בלחץ. זו תכונה מצוינת למערכות שדורשות **לחץ יציב** כשהביקוש משתנה, למשל רשת אספקת מים עירונית שבה צרכנים נפתחים ונסגרים כל הזמן, או מערכת כיבוי אש. אבל יש לזה מחיר: כשהעקום שטוח, שינוי קטן בעומד המערכת גורר שינוי גדול בספיקה, ולכן המשאבה "רגישה" ונקודת העבודה שלה נודדת הרבה.

עקום תלול (steep curve)

עקום תלול יורד בחדות. כאן ההפך: שינוי גדול בעומד גורר שינוי קטן בספיקה, ולכן הספיקה **יציבה** גם כשעומד המערכת משתנה. זו תכונה רצויה כשרוצים שהספיקה תישאר קבועה, למשל בהזנת מים לדוד קיטור, או כשעובדים מול עומד סטטי משתנה (מפלס מאגר שעולה ויורד). יתרון נוסף: עקום תלול נותן הפרש גדול בין עומד העבודה לעומד הסגירה, מה שמגן מפני נדנד נקודת העבודה ומפני עבודה מקבילית לא יציבה (פרק 18).



איור 13.2 · עקום שטוח (flat) מול תלול (steep), אותו שינוי לחץ, שתי תגובות הפוכות. הפס האדמדם הוא שינוי עומד קטן ΔH ; הנקודות המוקפות לבן מסמנות היכן כל עקום חוצה אותו. בעקום השטוח (טורקיז) הפס גורר שינוי ספיקה גדול (ΔQ_{large}), לחץ יציב אך ספיקה רגישה; בעקום התלול (זהב) אותו פס גורר שינוי ספיקה קטן (ΔQ_{small}), ולכן הספיקה יציבה גם כשהעומד משתנה.

סכמטי · להמחשת ההבדל בשיפוע, לא בקנה מידה

מי קובע את צורת העקום: המהירות הסגולית

צורת העקום אינה מקרית. כפי שראינו בפרק 11 (ובהרחבה בפרק 14), ה**מהירות הסגולית** (*specific speed, n_q*) של המאיץ קובעת אותה. מאיצים רדיאליים בעלי מהירות סגולית נמוכה (בוסטרים, עומד גבוה) נוטים לעקום **שטוח** יחסית עם עליית הספק מתונה, בעוד מאיצים בעלי מהירות סגולית גבוהה יותר נותנים עקומים **תלולים** יותר. הצורה היא תוצאה ישירה של הגיאומטריה, ולכן אי אפשר "לבחור" צורת עקום בלי לבחור את סוג המאיץ המתאים. זה מקשר את הפרק הזה ישירות אל פרק 14, שם נראה איך חוקי הדמיות מאפשרים להיזקק לעקום קיים שמאלה או ימינה על ידי שינוי מהירות סיבוב או חיתוך מאיץ.

טבלה 13.2 · עקום שטוח מול תלול, מתי כל אחד מתאים (כלי בחירה)

תכונה	עקום שטוח (FLAT)	עקום תלול (STEEP)
תגובת לחץ לשינוי ספיקה	לחץ יציב מאוד	לחץ משתנה בחדות
תגובת ספיקה לשינוי עומד	ספיקה רגישה (נודדת הרבה)	ספיקה יציבה
מתאים ל-	רשת מים עירונית, כיבוי אש, לחץ קבוע	הזנת דוד, עומד סטטי משתנה, ספיקה קבועה
עבודה מקבילית (פרק 18)	פחות יציבה, סיכון לחלוקת עומס לא שווה	יציבה, חלוקת עומס טובה
מהירות סגולית אופיינית	נמוכה (רדיאלי, בוסטר)	בינונית עד גבוהה

↑
NPSHr עולה
סכנה בספיקה גבוהה

70-120%
טווח מועדף
POR סביב BEP

BEP
שיא נצילות
עוגן הכל

4
עקומות
על דף אחד

למה עקום הנצילות מתאפס בשני הקצוות

בספיקה אפס המשאבה מסתובבת ומבזבזת הספק על חיכוך וחימום, אבל אינה מזיזה מים קדימה, ולכן העבודה ההידראולית המועילה היא אפס והנצילות אפס. בספיקה מקסימלית העומד צונח כמעט לאפס, ושוב המכפלה $\rho \cdot g \cdot Q \cdot H$ קטנה ביחס להספק הנמשך, אז הנצילות נופלת. רק באמצע, ב-BEP, המכפלה של ספיקה ועומד מגיעה ליחס האופטימלי מול ההספק. זו הסיבה הפיזיקלית לצורת הגבעה, וזו הסיבה שעבודה רחוק מ-BEP תמיד מבזבזת חשמל.

אז מה? עקום אחד מספר את כל הסיפור של המשאבה. ארבע עקומות על דף אחד אומרות לך, בכל ספיקה, איזה עומד תקבל, כמה תהיה יעיל, כמה חשמל תמשוך וכמה NPSH תצטרך. מי שיודע לקרוא עקום ולמקם עליו את נקודת העבודה מול ה-BEP יודע מיד אם המשאבה מתאימה ליישום, אם היא מבזבזת חשמל, ואם היא בדרך לשחיקה מוקדמת. כשתבדוק משאבה בשטח (פרק 25) ותמצא נצילות נמוכה, חזור לכאן ושאל קודם כל: איפה נקודת העבודה יושבת על העקום ביחס ל-BEP. לעיתים קרובות הבעיה אינה המשאבה אלא המיקום השגוי שלה על העקום שלה.

קישורים בספר

איך מזיזים את כל העקום על ידי שינוי מהירות או חיתוך מאיץ, ומה קובעת המהירות הסגולית, בפרק 14. עקום ה-NPSHr וסכנת הקוויטציה במלואם בפרק 15. חיתוך עקום המשאבה עם עקום המערכת ומציאת נקודת העבודה האמיתית בפרק 16; עבודה בטור ובמקביל בפרק 18. בחירת משאבה שלמה לנקודת עבודה, עם ה-BEP בתוך ה-POR כתנאי, בפרק 17. אבחון נקודת עבודה שגויה דרך בדיקת נצילות בשטח בפרק 25.

14 חוקי הדמיות, חיתוך מאיץ ומהירות סגולית

Affinity Laws, Impeller Trimming & Specific Speed

בקצרה

חוקי הדמיות (affinity laws) הם אולי הכלי המעשי החשוב ביותר בכל הספר. הם אומרים, בשלוש שורות פשוטות, איך הספיקה, העומד וההספק של משאבה משתנים כשמשנים את **מהירות הסיבוב** או את **קוטר המאיץ**. בלי שום ניסוי חדש, רק כלל שלוש. הכלל המכריע מבין השלושה: **ההספק משתנה בחזקה שלישית של המהירות**. הורדה קטנה במהירות חוסכת המון חשמל. זה השורש לכל הכדאיות של ממיר התדר (פרק 21), והוא גם מסביר למה אפשר לחתוך מאיץ במחרטה כדי "לתפור" משאבה גדולה מדי לנקודת העבודה. בסוף הפרק נכיר את **המהירות הסגולית של יניקה (suction specific speed)**, מספר אחד שמסגיר מתי מאיץ רגיש לקוויטציה.

הרעיון: עקומה אחת, אינסוף מהירויות

משאבה אחת איננה עקומה אחת. היא משפחה שלמה של עקומות, אחת לכל מהירות סיבוב. חוקי הדמיות הם נוסחת הגזירה שמייצרת את כל בני המשפחה מתוך אחד מהם.

נחזור לרגע לפרק 13. שם ראינו שלכל משאבה יש עקום מאפיין, גרף של העומד H מול הספיקה Q במהירות הסיבוב הנקובה שלה. אבל מה קורה לעקום הזה אם מסובבים את המאיץ לאט יותר, נניח ב-80 אחוז מהמהירות? התשובה היפה היא שהעקום אינו משנה את צורתו, הוא פשוט **מתכווץ באופן צפוי לחלוטין** כלפי הראשית. כל נקודה על העקום הישן עוברת לנקודה חדשה לפי שלושה כללים פשוטים, וזהו. אין צורך למדוד מחדש, אין צורך בעקום נוסף מהיצרן.

הסיבה הפיזיקלית עמוקה אך אינטואיטיבית. כל עוד **משולשי המהירות (velocity triangles)** בכניסה וביציאה של המאיץ שומרים על אותה צורה, רק גדלים או קטנים פרופורציונלית, הזרימה "דומה לעצמה" (זה מקור השם, affinity = דמיון). כשמכפילים את מהירות הסיבוב, מהירות הנוזל בכל נקודה מוכפלת, ולכן הספיקה מוכפלת. אבל העומד נבנה מאנרגיה קינטית, שתלויה בריבוע המהירות, ולכן העומד גדל פי ארבע. וההספק הוא ספיקה כפול לחץ, ולכן הוא גדל פי שמונה. שלוש החזקות, 1 ו-2 ו-3, נובעות ישירות מהפיזיקה הזו.

חוקי הדמיות · affinity laws

שלושה כללי פרופורציה שמתארים איך P , Q , H של משאבה צנטריפוגלית משתנים עם מהירות הסיבוב n או קוטר המאיץ D , כל עוד הזרימה נשארת דומה לעצמה.

יחס המהירות · speed ratio (r)

היחס חסר-היחידות $r = n_2/n_1$ בין המהירות החדשה לישנה. למשאבה מונעת ממיר תדר זה פשוט $r = f_2/f_1$, יחס התדרים. הוא הגודל שמזין את כל שלושת הכללים.

מהירות סגולית · specific speed (n_q)

מספר הצורה של המאיץ (פרק 5 ופרק 11), $n_q = n \cdot \sqrt{Q} / H^{0.75}$, שמור לחלוטין תחת חוקי הדמיות, ולכן הוא ה"תעודת זהות" שלא משתנה כשמאיצים או מאטים.

שלושת חוקי הדמיות לשינוי מהירות

נתחיל מהמקרה הנפוץ והחשוב: אותו מאיץ בדיוק, אבל מסתובב במהירות אחרת. זה מה שעושה ממיר תדר. שלושת הכללים, יחד, הם כל מה שצריך.

נוסחה 14.1 · חוקי הדמיות (שינוי מהירות)

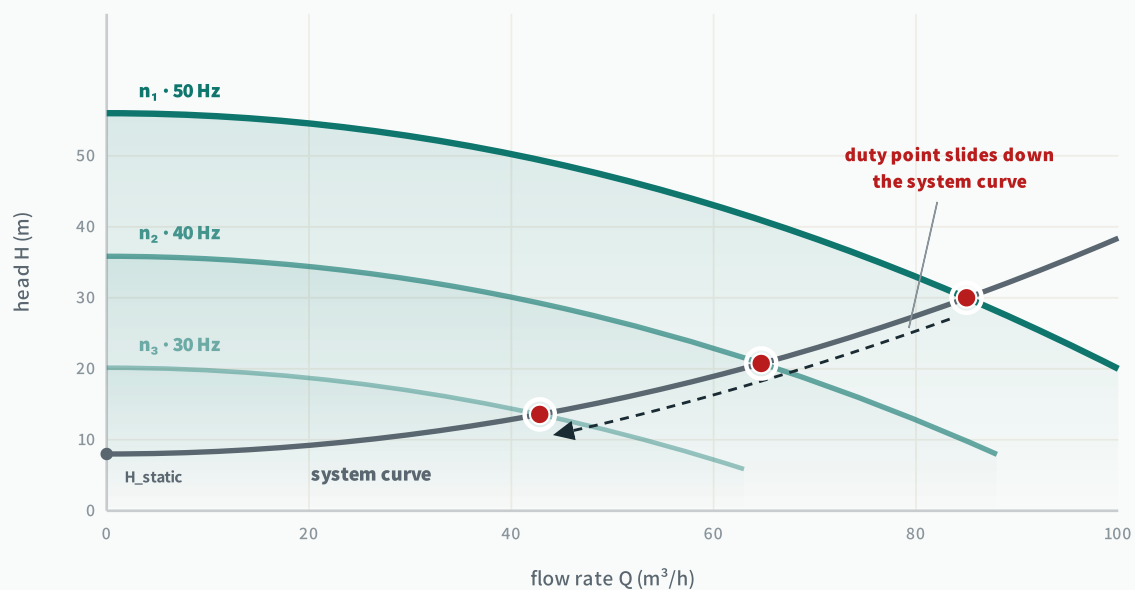
$$Q_2/Q_1 = (n_2/n_1) \quad \cdot \quad H_2/H_1 = (n_2/n_1)^2 \quad \cdot \quad P_2/P_1 = (n_2/n_1)^3$$

Q	הספיקה משתנה ישר עם המהירות (חזקה ראשונה). חצי מהירות = חצי ספיקה.
H	העומד משתנה עם ריבוע המהירות. חצי מהירות = רבע עומד.
P	ההספק משתנה עם חזקה שלישית של המהירות. חצי מהירות = שמינית הספק. כאן נמצא החיסכון.
η	הנצילות נשמרת בקירוב טוב, $\eta_2 \approx \eta_1$. יורדת מעט מאוד רק ביחסים נמוכים מאוד ($r < 0.5$).
$NPSHr$	גם ה- $NPSHr$ הנדרש מתכווץ בערך עם ריבוע המהירות: $NPSHr \propto n^2$. האטה מקטינה את סכנת הקוויטציה (פרק 15).

למה דווקא 1, 2, 3

שרשרת ההיגיון קצרה ומשתלמת לזכור. **ספיקה** היא מהירות הנוזל כפול שטח, והשטח קבוע, ולכן $Q \propto n$ (חזקה 1). **עומד** הוא אנרגיה קינטית למשקל, $H \propto u^2/2g$, והמהירות ההיקפית u פרופורציונלית ל- n , ולכן $H \propto n^2$ (חזקה 2). **הספק** הוא ספיקה כפול לחץ, $P \propto Q \cdot H \propto n \cdot n^2 = n^3$ (חזקה 3). שלושת הכללים אינם שלוש עובדות נפרדות שצריך לשנן, אלא מסקנה אחת מתגלגלת.

שימו לב לעוצמה המעשית: אם היצרן נתן לכם עקום אחד בלבד, ב-1450 סל"ד, אתם יכולים לשרטט את העקום ב-1160, ב-1740 ובכל מהירות אחרת בלי שום מידע נוסף. כל נקודת (Q , H) לנקודה חדשה ($Q \cdot r$, $H \cdot r^2$). החיבור של כל הנקודות הזזות נותן את העקום החדש. זה בדיוק מה שעושה הסליידר ב-VFD בכלי בחירה ממוחשבים: בכל הזזה הוא מיישם את נוסחה 14.1 על מאות נקודות בפחות מ-50 אלפיות שנייה.



איור 14.1 · משפחת עקומות של אותה משאבה בשלוש מהירויות: 50 Hz (טורקיז מלא), 40 Hz ו-30 Hz (הולכים ובהירים), כל עקום נגזר מקודמו בדיוק לפי חוקי הדמיות. עקום המערכת (אפור) מטפס מהעומד הסטטי, ונקודת העבודה (אדום בהילה לבנה), המפגש בין שני העקומים, מחליקה למטה-שמאלה לאורך עקום המערכת ככל שהמהירות יורדת. כך ממיר תדר מתאים את הספיקה לביקוש בלי לשנוק את הזרימה בשסתום.

סכמטי · עקום מערכת עם עומד סטטי קטן, להמחשת העיקרון

משאבה מונעת ממיר תדר עובדת ב-1450 סל"ד ומספקת יותר מהנדרש. נוריד את התדר מ-50 ל-40 הרץ, כלומר את המהירות ל-1160 סל"ד, ונחשב את נקודת העבודה החדשה ואת החיסכון.

$$P_1 = 18 \text{ kW} \quad H_1 = 50 \text{ m} \quad Q_1 = 80 \text{ m}^3/\text{h} \quad n_2 = 1160 \text{ rpm (40 Hz)} \quad n_1 = 1450 \text{ rpm (50 Hz)}$$

1 נחשב את יחס המהירות (חסר-יחידות):

$$r = n_2/n_1 = 1160 / 1450 = 0.80$$

2 ספיקה חדשה, יחס ישר (חזקה 1): $Q_2 = 80 \cdot 0.80 = 64 \text{ m}^3/\text{h}$

3 עומד חדש, ריבוע היחס (חזקה 2):

$$H_2 = 50 \cdot 0.80^2 = 50 \cdot 0.64 = 32 \text{ m}$$

4 הספק חדש, חזקה שלישית (חזקה 3):

$$P_2 = 18 \cdot 0.80^3 = 18 \cdot 0.512 = 9.2 \text{ kW}$$

תוצאה: ירידה של 20% במהירות הורידה את הספיקה ל-64 m³/h ואת העומד ל-32 m, אבל את ההספק היא חתכה כמעט בחצי, מ-18 kW ל-9.2 kW. זה חיסכון של כ-49% בהספק הציר. **זה הקסם של חוק החזקה השלישית.**

אימות מהיר של החזקה השלישית: $0.8^3 = 0.8 \cdot 0.8 \cdot 0.8 = 0.512$. ההספק נשאר 51.2% מהמקורי, ולכן נחסכו 48.8%. שימו לב כמה לא-לינארי זה: 20% פחות מהירות אבל כמעט 50% פחות חשמל. ההפרש הזה הוא בדיוק מה שהופך ממיר תדר לכדאי.

הסתייגות חשובה • עומד סטטי

החיסכון המלא לפי $P \propto n^3$ מתקיים במלואו רק כשעקום המערכת עובר דרך הראשית, כלומר כשהעומד כולו עומד חיכוך ואין **עומד סטטי** (הרמה לגובה קבוע). כשיש עומד סטטי גבוה, נקודת העבודה לא מחליקה לאורך פרבולה דרך הראשית אלא לאורך עקום שמתחיל גבוה, ולכן ההורדה במהירות מוגבלת והחיסכון קטן יותר. את החשבון המדויק, פרק 21, מבצעים על שילוב עקום המשאבה ועקום המערכת, לא על חוק החזקה השלישית לבדו.

טבלה 14.1 • מכפילי חוקי הדמיות ביחסי מהירות נפוצים (כלי עזר)

חיסכון הספק	$\times P (R^3)$	$\times H (R^2)$	$\times Q (R)$	תדר (Hz מ-50)	$R = N_2/N_1$ יחס
0%	1.000	1.000	1.000	50.0 Hz	1.00
14%	0.857	0.903	0.950	47.5 Hz	0.95
27%	0.729	0.810	0.900	45.0 Hz	0.90
39%	0.614	0.723	0.850	42.5 Hz	0.85
49%	0.512	0.640	0.800	40.0 Hz	0.80
66%	0.343	0.490	0.700	35.0 Hz	0.70
78%	0.216	0.360	0.600	30.0 Hz	0.60

איך קוראים את הטבלה

בחרו שורה לפי המהירות החדשה שאתם שוקלים. עמודות $\times P$, $\times H$, $\times Q$ הן המכפילים שמיישמים על נקודת העבודה הנקובה. למשל ב-45 Hz (יחס 0.90): הספיקה יורדת ל-90%, העומד ל-81%, וההספק ל-73% בלבד, חיסכון של 27%. שימו לב שעמודת ההספק נופלת הרבה יותר מהר מהשתיים שלפניה, וזה כל הסיפור.

חיתוך מאיץ: אותם כללים, אבל עם הקוטר

ממיר תדר משנה את המהירות. אבל יש דרך שנייה, מכנית וזולה, להוריד את ביצועי המשאבה כשהיא גדולה מדי לנקודת העבודה: להקטין את קוטר המאיץ במחרטה. זה נקרא **חיתוך מאיץ** (*impeller trimming*), ולשינוי הקוטר חלים חוקי דמיות כמעט זהים לאלה של המהירות.

נוסחה 14.2 • חוקי הדמיות (חיתוך מאיץ, אותה מהירות)

$$Q_2/Q_1 = (D_2/D_1) \cdot H_2/H_1 = (D_2/D_1)^2 \cdot P_2/P_1 = (D_2/D_1)^3$$

D_2/D_1 יחס הקוטר אחרי החיתוך לקוטר המקורי. למשל חיתוך מ-250 ל-225 מ"מ נותן יחס 0.90.
 Q, H, P אותן חזקות בדיוק כמו אצל המהירות: 1, 2, 3. הקוטר משחק את אותו תפקיד שמשחקת המהירות.
 $NPSH_r$ בניגוד לשינוי מהירות, NPSHr כמעט לא משתנה עם הקוטר. הוא נקבע בעיקר בעין היניקה, שאינה מחוּתכת.
 $\approx$ קירוב טוב לחיתוכים קטנים בלבד. ככל שחותכים יותר, הדיוק יורד והנצילות נפגעת (ראו האזהרה למטה).

החיתוך מקטין את קוטר המעגל החיצוני של המאיץ, ולכן את המהירות ההיקפית בקצהו. מכיוון שהעומד נבנה מאותה מהירות היקפית (פרק 8), הקטנת הקוטר מורידה את העומד בדיוק כמו הקטנת המהירות. ההבדל המרכזי, וגם מקור המגבלה, הוא שכשמחתכים מאיץ הוא כבר לא ממלא את גוף הספירלה כמו שתוכנן. נוצר מרווח גדל והולך בין קצה המאיץ לבין לשון

הספירלה, ובמרווח הזה הזרימה מאבדת אנרגיה. לכן חיתוך קטן כמעט שאינו פוגע בנצילות, אבל חיתוך גדול פוגע, ובחיתוך אגרסיבי הקירוב של חוקי הדמיות פשוט נשבר.

גבול החיתוך • עד כמה אפשר

הכלל המעשי: אל תחתכו מאיץ אל מתחת ל-75 עד 85 אחוז מהקוטר המקורי, כלומר חיתוך של עד כ-15 עד 25 אחוז לכל היותר. מתחת לזה הנצילות צונחת בכמה נקודות אחוז, המרווח מול הלשון גדל מדי, והעומד שמתקבל בפועל נמוך מזה שחוקי הדמיות מנבאים. אם צריך הורדה גדולה יותר, עדיף ממיר תדר או מאיץ קטן יותר מהסדרה. וזכרו: **חיתוך הוא בלתי הפיך**. חותכים בשלבים קטנים, מודדים בין שלב לשלב, ומשאירים מעט מרווח, כי תמיד אפשר לחתוך עוד, אבל אי אפשר להחזיר מתכת.

ממיר תדר מול חיתוך מאיץ: מתי כל אחד

שתי השיטות מורידות עומד עודף, אבל הן שונות בתכלית. ממיר תדר הוא פתרון **משתנה והפיך**: אפשר לכוונן את המהירות בכל רגע, להעלות ולהוריד, ולעקוב אחרי ביקוש שמשתנה לאורך היום. חיתוך מאיץ הוא פתרון **קבוע וחד-פעמי**: זול מאוד (עבודת מחרטה בלבד, בלי אלקטרוניקה), אבל מקבע את המשאבה לנקודה אחת לתמיד.

חיתוך מאיץ • מתי עדיף

- **עומד עודף קבוע** • נקודת עבודה אחת יציבה שלא משתנה.
- **זול מאוד** • עבודת מחרטה, בלי רכש אלקטרוניקה ובלי תחזוקה.
- **בלי אובדן בממיר** • אין הפסדי המרה של 2 עד 3 אחוז כמו ב-VFD.
- **פשוט ועמיד** • שום רכיב אלקטרוני שיכול להתקלקל בשטח.

ממיר תדר (VFD) • מתי עדיף

- **ביקוש משתנה** • ספיקה שונה לאורך היום, עונה או שנה.
- **הפיך וגמיש** • מכווננים בכל רגע, בלי לגעת במשאבה.
- **חיסכון מקסימלי** • עוקב אחרי הביקוש בזמן אמת לאורך חוק החזקה השלישית.
- **בנוס** • התנעה רכה, מגן על המנוע, מוריד קנסות מקדם הספק.

כלל אצבע לשטח

אם הספיקה הנדרשת **קבועה** והמשאבה פשוט מייצרת קצת יותר מדי עומד, חיתוך מאיץ הוא הפתרון הזול והנכון. אם הביקוש **משתנה** לאורך היממה או העונה, או אם רוצים גם התנעה רכה והגנת מנוע, ממיר תדר מחזיר את ההשקעה דרך החיסכון. לא נדיר לשלב את השניים: חותכים מאיץ קרוב לנקודה האופיינית, ומוסיפים ממיר תדר לכיוונון העדין סביבה.

מהירות סגולית: תעודת הזהות שלא משתנה

בפרק 5 פגשנו את **המהירות הסגולית** ($specific\ speed, n_q$), המספר שקובע את צורת המאיץ. הסיבה שהוא חוזר כאן היא יפה: **המהירות הסגולית שמורה תחת חוקי הדמיות**. כשמשנים מהירות, $H-Q$ זזים אבל הצירוף $H^{0.75} / Q$ נשאר זהה בדיוק; בחיתוך מאיץ הוא נשמר רק בקירוב: המהירות הסגולית עולה מעט ככל שמקטינים את הקוטר (ביחס הפוך ל- D), עדות לכך

שהדמיון הגיאומטרי נשבר. לכן מאיץ לא משנה את "מהירותו הסגולית" כשמאיצים אותו או חותכים אותו מעט, והוא נשאר אותו טיפוס צורני.

נוסחה 14.3 • מהירות סגולית (תזכורת מפרק 5)

$$n_q = n \cdot \sqrt{Q} / H^{0.75}$$

n	מהירות הסיבוב [rpm].
Q	ספיקה בנקודת ה-BEP [m ³ /s]. למאיץ דו-יניקה לוקחים חצי ספיקה.
H	עומד לדרגה אחת בנקודת ה-BEP [m].
n _q	נמוך = רדיאלי (עומד גבוה, ספיקה נמוכה). גבוה = אקסיאלי (ספיקה גבוהה, עומד נמוך). השיא בנצילות סביב 40–60 n _q .

מהירות סגולית של יניקה והסכנה ב-Nss גבוה

יש בן-דוד חשוב למהירות הסגולית, שעוסק לא בעומד שהמשאבה מייצרת אלא ב**יניקה** שהיא דורשת: **המהירות הסגולית של יניקה** (*suction specific speed, N_{ss}*). במקום העומד H, היא משתמשת ב-NPSHr, ולכן היא מודדת עד כמה "אגרסיבי" תוכנן צד היניקה של המאיץ.

נוסחה 14.4 • מהירות סגולית של יניקה

$$N_{ss} = n \cdot \sqrt{Q} / \text{NPSHr}^{0.75}$$

n	מהירות הסיבוב [rpm].
Q	ספיקה בנקודת ה-BEP. להשוואה מול הסף 11,000 מציבים אותה ב-[gpm] ואת ה-NPSHr ברגל; ביחידות מטריות משווים לסף המקביל (למטה).
NPSHr	ה-NPSH הנדרש בנקודת ה-BEP [m], מעקום היצרן.
N _{ss}	גבוה = עין יניקה גדולה ו-NPSHr נמוך, אבל גם רגישות גבוהה לרה-סירקולציה. הסף האזהרה: 11,000 ≈ ביחידות האמריקאיות הנפוצות (ft ^{0.75} /rpm-√gpm / m ³ /h); ביחידות m ³ /h הסף המקביל 12,800 ≈, וביחידות m ³ /s (SI) 213 ≈.

למה Nss גבוה הוא דגל אדום

מאיץ עם עין יניקה גדולה דורש פחות עודף עומד, כלומר NPSHr נמוך, וזה נשמע מצוין. אבל עין גדולה מדי משלמת מחיר: בספיקות נמוכות הזרימה בכניסה אינה ממלאת את כל החתך, נוצרת **רה-סירקולציה ביניקה** (*suction recirculation*), מערבולת אלימה שמחזירה נוזל לאחור בקצה העין. היא גורמת רעידות, רעש, ושחיקת קוויטציה דווקא הרחק מהספיקה הנקובה. הכלל המעשי: כש- $N_{ss} > 11,000$ (ביחידות האמריקאיות), המאיץ **רגיש לקוויטציה ולרה-סירקולציה**, וצריך לשמור על טווח עבודה צר יותר סביב ה-BEP. מאיצים "רגילים" יושבים בערך באזור 7,000–9,000. כשבחרים משאבה (פרק 17), Nss נמוך-בינוני הוא סימן לעיצוב יניקה שמרני ובטוח.

זהירות עם יחידות ב-Nss

בניגוד למהירות הסגולית הרגילה, ל-Nss אין ערך אוניברסלי אחד, כי הוא תלוי במערכת היחידות. הסף $\approx 11,000$ הוא ביחידות האמריקאיות ($\text{rpm} \cdot \sqrt{\text{gpm}} / \text{ft}^{0.75}$). באירופה משתמשים ב- m^3/s ו- m ומקבלים מספרים אחרים לגמרי. **תמיד ודאו באילו יחידות ניתן הערך לפני שמשווים אותו לסף.** אם יצרן מפרסם Nss בלי יחידות, זה דגל אדום בפני עצמו.

סיכום: שלוש החזקות, שני המנופים, מספר אחד

נחבר הכל. שני "מנופים" קיימים בידי המהנדס כדי להזיז את עקום המשאבה, מהירות וקוטר, ושניהם מצייתים לאותם שלושה כללי דמיות, חזקות 1, 2, 3 על הספיקה, העומד וההספק. החזקה השלישית של ההספק היא מנוע החיסכון, והמהירות הסגולית, על שני גלגליה, היא המספר שמתאר את צורת המאיץ ואת אופי היניקה שלו ושאינו משתנה בשינוי מהירות, ומשתנה רק מעט בחיתוך.



נצילות η
נשמרת בקירוב

n^3

הספק P
חזקה שלישית = החיסכון

n^2

עומד H
ריבוע המהירות

n^1

ספיקה Q
ישר עם המהירות

אז מה? חזקת שלוש היא מנוע החיסכון, ושלוש שורות נוסחה הן כל מה שצריך כדי לרתום אותה.

כשמשאבה מספקת יותר מהנדרש, לא ממהרים להחליף אותה: בודקים אם הורדת מהירות בממיר תדר או חיתוך מאיץ קטן מתאימים את העקום לביקוש. הורדה של 20% במהירות חוסכת כמעט 50% מהחשמל, כפי שראינו בדוגמה 14.1. ממיר תדר נכון כשהביקוש משתנה, חיתוך מאיץ נכון כשהוא קבוע, ולעולם לא חותכים אל מתחת לכ-80% מהקוטר. וכשבחרים משאבה חדשה, הציצו במהירות הסגולית של היניקה: Nss נמוך-בינוני הוא הבטחה לעבודה שקטה בלי קוויטציה מפתיעה.

קישורים בספר

עקום המאפיין שאת בני-משפחתו ייצרנו כאן נקרא בפרק 13. צורת המאיץ לפי המהירות הסגולית בפרק 5. השפעת חוקי הדמיות על NPSHr ועל סכנת הקוויטציה בפרק 15. בחירת משאבה עם אימות NPSH כשלב חובה בפרק 17. ההצדקה הכלכלית המלאה של ממיר תדר מול מתנע, על שילוב עקום המשאבה ועקום המערכת, בפרק 16 (עקום המערכת) ובפרק 21 (ויסות ספיקה וממיר תדר).

15 NPSH וקוויטציה

Net Positive Suction Head & Cavitation

בקצרה

קוויטציה היא היווצרות בועות אדים בצד היניקה של המשאבה והתמוטטותן האלימה במאיץ. היא מכרסמת מתכת, מורידה ספיקה ועומד, גורמת לרעש ולרעידות, ובסוף הורסת את המשאבה.

כדי למנוע אותה משווים שני גדלים: **NPSH זמין** (מה שהמערכת מספקת בצד היניקה) מול **NPSH נדרש** (מה שהמשאבה דורשת). הכלל פשוט: $NPSH_a > NPSH_r$, ועם שולי ביטחון. כל הפרק הזה הוא איך לחשב את שני הגדלים האלה ואיך לשמור מרווח בריא ביניהם.

מה זו קוויטציה ולמה היא מסוכנת

נוזל רותח לא רק כשמחממים אותו. הוא רותח גם כשמורידים לו את הלחץ. זו נקודת המפתח של הפרק כולו.

בכניסה למאיץ הנוזל מואץ, והלחץ המקומי שלו צונח. אם הלחץ יורד עד **לחץ האדים** (*vapor pressure*) של המים בטמפרטורה הנתונה, המים מתאדים בתוך המשאבה ונוצרות בועות אדים זעירות. מילימטרים ספורים אחר כך, כשהנוזל נכנס לאזור הלחץ הגבוה של גוף המשאבה, הבועות קורסות בבת אחת. כל קריסה כזו היא פיצוץ זעיר ששולח גל הלם ומזרק נוזל במהירות אדירה אל פני המתכת.

מיליוני קריסות בשנייה יוצרות בלאי שנראה כמו ספוג, בעיקר על גב להבי המאיץ. זו **שחיקת קוויטציה** (*cavitation erosion*). מעבר לנזק המכני, שכבת הבועות חוסמת את מעבר הנוזל, ולכן הספיקה והעומד צונחים והנצילות יורדת. בשטח מזהים קוויטציה לפי רעש אופייני, כאילו המשאבה שואבת חצץ.

· Net Positive Suction Head **NPSH**

"עומד יניקה חיובי נטו". כמה אנרגיית לחץ נשארת לנוזל בכניסה למשאבה **מעל** לחץ האדים שלו. נמדד במטרים של עמוד מים. זה המדד שקובע אם תהיה קוויטציה.

· לחץ אדים p_v (*vapor pressure*)

הלחץ שבו הנוזל מתחיל לרתוח בטמפרטורה נתונה. עולה מהר עם הטמפרטורה. למים קרים הוא זניח, למים חמים הוא משמעותי.

שני הגדלים: NPSH זמין מול NPSH נדרש

הסיפור כולו הוא תחרות בין שני מספרים, שניהם במטרים.

NPSH נדרש (NPSHr) • תכונה של המשאבה

זה גודל שהיצרן מודד ומפרסם בעקום. הוא אומר כמה עודף עומד המשאבה חייבת לקבל בכניסה כדי לא לקוות. NPSHr עולה עם הספיקה, ולכן הוא מצויר כעקום עולה מתחת לעקום ה-H-Q. ככל שמזרימים יותר, המשאבה רעבה ליותר עודף עומד.

NPSH זמין (NPSHa) • תכונה של המערכת

זה מה שהמתקן שלך מספק בפועל בכניסה למשאבה, וזה מה שאתה כמתכנן או מנהל אחזקה שולט בו. הוא נקבע מהלחץ האטמוספרי, מגובה המים ביחס למשאבה, מאיבודי החיכוך בצנרת היניקה, ומלחץ האדים של הנוזל.

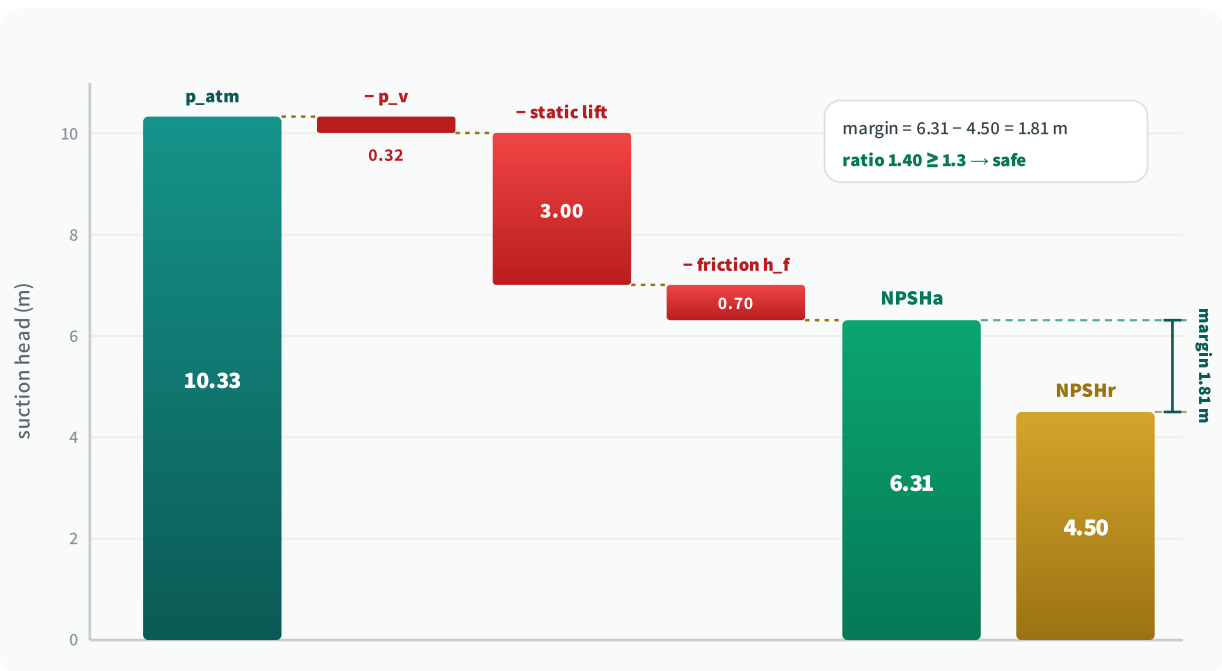
נוסחה 15.1 • NPSH זמין

$$\text{NPSHa} = (p_{\text{atm}} - p_v) / (\rho \cdot g) \pm H_s - h_f$$

הלחץ האטמוספרי. בגובה פני הים $101.3 \text{ kPa} = 10.33 \text{ m}$. יורד עם הגובה.	p_{atm}
לחץ האדים של הנוזל בטמפרטורת העבודה (מתוך טבלה 15.1).	p_v
צפיפות $\times$ תאוצת הכובד. למים קרים $\rho = 1000$, $g = 9.81$. ממיר פסקל למטרים.	$\rho \cdot g$
הפרש הגובה בין מפלס המים לציר המשאבה. חיובי אם המים מעל המשאבה (הצפה), שלילי אם המשאבה מעל המים (יניקה).	H_s
איבודי החיכוך בצנרת היניקה בלבד [m], בספיקת העבודה. תמיד מחסירים.	h_f

למה תמיד מחסירים את החיכוך

איבודי החיכוך בצד היניקה גדלים עם ריבוע הספיקה ($h_f \propto Q^2$). לכן ככל שמזרימים יותר, NPSHa יורד בדיוק כש-NPSHr עולה. שני העקומים נעים זה לקראת זה, וזו הסיבה שקוויטציה מופיעה דווקא בספיקות גבוהות.



איור 15.1 · מאזן האנרגיה בצד היניקה כמפל מדרגות, לפי דוגמה 15.1. מתחילים מתקציב הלחץ האטמוספרי (טורקיז, 10.33 m), מחסירים בצעדים אדומים את לחץ האדים, את עליית היניקה ואת חיכוך הצנרת, ונשארים עם ה-NPSH הזמין (ירוק). מולו ניצבת דרישת המשאבה NPSHr (זהב), והמרחק ביניהם, סוגר המרווח מימין, הוא רזרבת הביטחון מפני קוויטציה.

מבוסס על דוגמה 15.1 · גובה פני הים, מים ב-25°C

תחנת שאיבה בגובה פני הים שואבת מים ממאגר פתוח. המשאבה ניצבת מעל מפלס המים (יניקה). נבדוק אם יש סכנת קוויטציה בנקודת העבודה.

$$H_s = -3.0 \text{ m (משאבה מעל המים)} \quad T = 25^\circ\text{C} \rightarrow p_v = 0.32 \text{ m} \quad p_{\text{atm}} = 10.33 \text{ m (101.3 kPa)}$$

$$NPSH_r = 4.5 \text{ m (מעקום היצרן)} \quad h_f = 0.7 \text{ m (חיכוך יניקה)}$$

1 נמיר את הלחץ האטמוספרי ולחץ האדים למטרים (כבר נתון):

$$p_{\text{atm}} = 10.33 \text{ m}, \quad p_v = 0.32 \text{ m}$$

2 נציב בנוסחה 15.1 עם H_s שלילי (יניקה):

$$NPSH_a = 10.33 - 0.32 - 3.0 - 0.7$$

3 נקבל את ה-NPSH הזמין: $NPSH_a = 6.31 \text{ m}$

4 נשווה ל-NPSH הנדרש ונחשב מרווח ויחס:

$$\text{margin} = 6.31 - 4.5 = 1.81 \text{ m} ; \text{ratio} = 6.31 / 4.5 = 1.40$$

תוצאה: **$NPSH_a = 6.31 \text{ m}$** מול $NPSH_r = 4.5 \text{ m}$. היחס 1.40 גדול מ-1.3 הנדרש. המתקן בטוח מקוויטציה בנקודת העבודה הזו.

אבל מה קורה בקיץ? נניח שהמים מתחממים ל- 60°C (למשל במערכת קירור). מטבלה 15.1, $p_v(60^\circ\text{C}) = 2.03 \text{ m}$. נחזור על החישוב:

$$NPSH_a = 10.33 - 2.03 - 3.0 - 0.7 = 4.60 \text{ m}$$

כעת היחס הוא רק **$4.60 / 4.5 = 1.02$** . המרווח התכווץ ל-0.10 m בלבד. סכנת קוויטציה ממשית. אותו מתקן בדיוק, רק טמפרטורה גבוהה יותר, וכבר על הגבול.

הלקח: טמפרטורת הנוזל היא לא פרט שולי. כל עליית טמפרטורה מורידה את $NPSH_a$. תכנון שמתעלם ממנה עלול לעבוד בחורף ולקוות בקיץ.

טבלה 15.1 • לחץ אדים של מים נקיים מול טמפרטורה (כלי עזר)

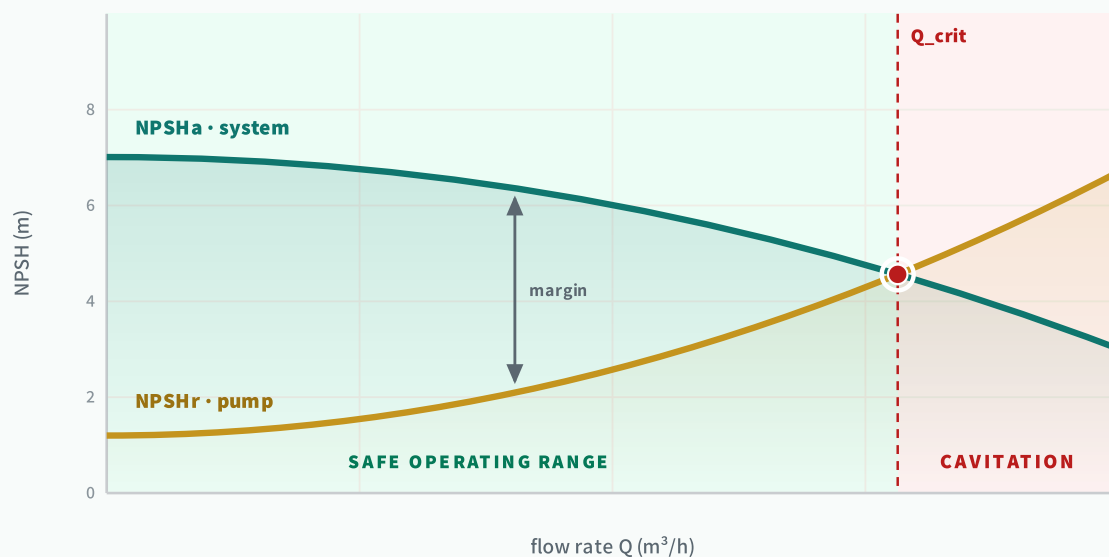
P_v (M)	P_v (KPA)	T (°C)	P_v (M)	P_v (KPA)	T (°C)
1.26	12.35	50	0.09	0.87	5
2.03	19.95	60	0.13	1.23	10
3.18	31.20	70	0.17	1.71	15
4.83	47.39	80	0.24	2.34	20
7.15	70.14	90	0.32	3.17	25
10.33	101.33	100	0.43	4.25	30
המרה: $m = kPa \div 9.81$			0.75	7.38	40

תיקון לגובה

הלחץ האטמוספרי יורד עם הגובה, בערך **0.12 m לכל 100 m**. תחנה ברמות הגולן או בהרי ירושלים בגובה 700 m מקבלת רק כ-**9.5 m** לחץ אטמוספרי במקום 10.33. זה מוריד את NPSHa בכ-0.8 m עוד לפני כל חישוב אחר. בתכנון בגובה, אל תשתמש ב-10.33.

איפה מופיעה הקוויטציה: מפגש שני העקומים

הדרך הטובה ביותר להבין סכנת קוויטציה היא לצייר את שני העקומים על אותו גרף מול הספיקה. NPSHr עולה, NPSHa יורד. כל עוד הזמין מעל הנדרש, המשאבה בריאה. נקודת החיתוך היא קו הגבול.



איור 15.2 · המספריים של הקוויטציה. ככל שהספיקה עולה, ה-NPSH הזמין (טורקיז) יורד כי חיכוך היניקה גדל עם Q^2 , וה-NPSH הנדרש (זהב) מטפס. חץ ה-margin מראה את המרווח שהולך ומתכווץ, עד נקודת החיתוך (אדום בהילה לבנה) בספיקה הקריטית Q_{crit} . מימין לה, באזור האדמדם, הנדרש עולה על הזמין והמשאבה נכנסת לקוויטציה.

סכמטי · להמחשת העיקרון

שולי ביטחון, מספר תומא ומהירות סגולית של יניקה

לעמוד בדיוק על הקו $NPSHa = NPSHr$ זה לא מספיק. $NPSHr$ של היצרן מוגדר בדרך כלל בנקודת ירידה של 3% בעומד ($NPSH_3$), כלומר קוויטציה כבר התחילה במידה מסוימת. לכן עובדים תמיד עם מרווח.

נוסחה 15.2 · כללי המרווח

$$NPSHa \geq NPSHr \times 1.3 \quad \text{או לפחות} \quad NPSHa - NPSHr \geq 0.6 \text{ m}$$

1.3 שוליים מומלצים על ידי Hydraulic Institute לרוב יישומי המים. למשאבות גדולות או נוזל חם נהוג מרווח גדול יותר.

σ מספר תומא (Thoma cavitation number): $\sigma = NPSHr / H$. מנרמל את דרישת היניקה מול עומד המשאבה.

Nss מהירות סגולית של יניקה: $Nss = n \cdot \sqrt{Q} / NPSHr^{0.75}$. מעל 11,000 (יחידות אמריקאיות, rpm- $\sqrt{\text{gpm/ft}^{0.75}}$) המשאבה רגישה לרה-סירקולציה ולכן לקוויטציה.

דגלים אדומים בשטח

- רעש כמו חצץ או כדורים שמתגלגלים בתוך המשאבה. הסימן הקלאסי.
- ספיקה ועומד שצונחים פתאום, או מד לחץ שרועד.
- גומות ובלאי ספוגי על גב להבי המאיץ כשפותחים את המשאבה.
- החמרה בקיץ או כשמפלס המקור יורד. שניהם מורידים את NPSHa.
- רעידות מוגברות בתדרים גבוהים. ראה פרק 24, ניטור מצב ורעידות.

איך מגדילים NPSHa בשטח

1

להוריד את המשאבה או להעלות את המקור

כל מטר שמקרב את המשאבה למים מוסיף מטר ל-NPSHa. הפתרון החזק ביותר.

2

להקטין את איבודי היניקה

קוטר צינור יניקה גדול יותר, פחות מרפקים, מסנן נקי. מורידים את h_f .

3

להוריד ספיקה

הזזת נקודת העבודה שמאלה מורידה את NPSHr ומעלה את NPSHa בו זמנית.

4

לבחור משאבה עם NPSHr נמוך יותר

אינדוסר (inducer, מאיץ-עזר אקסיאלי קטן שמותקן לפני המאיץ ומעלה את הלחץ בהדרגה) או מהירות סיבוב נמוכה מורידים את ה-NPSHr הנדרש; זהירות מעין יניקה גדולה מדי: היא מעלה את ה-Nss ומזמינה רה-סירקולציה (ראו לעיל).

אז מה? NPSH הוא לא נושא תאורטי, הוא חוזה ביטוח. לפני שבוחרים משאבה או מאבחנים רעש מוזר, מחשבים NPSHa בנקודת העבודה הגרועה ביותר, בטמפרטורה הגבוהה ביותר ובמפלס המקור הנמוך ביותר, ומוודאים מרווח של 30 אחוז מעל NPSHr. עשרים דקות חישוב חוסכות מאיץ שרוף.

קישורים בספר

עקום ה-NPSHr נקרא יחד עם שאר עקומות המאפיין בפרק 13. השפעת חוקי הדמיות על NPSHr ($NPSHr \propto n^2$) בפרק 14. בחירת משאבה עם בדיקת NPSH כשלב חובה בפרק 17. אבחון קוויטציה דרך רעידות בפרק 24.



חלק שישי

תכן מערכת ובחירת משאבה

System Design & Selection

עקום המערכת ונקודת העבודה 16

בחירת משאבה לפי נקודת תפעול 17

עבודה במקביל ובטור 18

16 עקום המערכת ונקודת העבודה

System Head Curve & the Operating Point

בקצרה

המשאבה לא בוחרת לבד באיזו ספיקה תעבוד. **המערכת** בוחרת יחד איתה. עקום המשאבה (יורד) ועקום המערכת (עולה) נפגשים בנקודה אחת ויחידה, היא **נקודת העבודה**. שם, ורק שם, המשאבה תעבוד בפועל.

עקום המערכת בנוי משני חלקים: **עומד סטטי** קבוע (הרמה לגובה והפרש לחץ) ו**עומד חיכוך** שגדל עם ריבוע הספיקה. הפרק הזה הוא איך לבנות את עקום המערכת, איך לחשב את החיכוך בשתי שיטות, ואיך לקרוא את נקודת העבודה מהמפגש. זה הבסיס לכל בחירת משאבה, ולכל הסבר למה שניקת שסתום מבזבזת אנרגיה.

שני העקומים שנפגשים

לעקום המשאבה הקדשנו את כל חלק ה'. אבל המשאבה אף פעם לא עובדת לבד. היא תמיד מחוברת לצנרת, לאביזרים ולהפרש גובה. כל אלה יחד הם "המערכת", ולמערכת יש עקום משלה.

הרעיון פשוט ועמוק. **עקום המשאבה** אומר כמה עומד המשאבה **מסוגלת** לייצר בכל ספיקה. הוא יורד: ככל שמזרימים יותר, המשאבה מספקת פחות עומד. **עקום המערכת** אומר כמה עומד המערכת **דורשת** בכל ספיקה. הוא עולה: ככל שמזרימים יותר, צריך להתגבר על יותר חיכוך. שני העקומים מצוירים על אותם צירים Q מול H, ויש להם בדיוק נקודת חיתוך אחת. שם ההיצע פוגש את הביקוש, וזו נקודת העבודה.

עקום המערכת · system head curve

העומד שהמערכת דורשת מהמשאבה כפונקציה של הספיקה. עולה עם הספיקה. נקבע מהגיאומטריה של המתקן, לא מהמשאבה.

עומד סטטי (H_{stat}) · static head

החלק הקבוע של עקום המערכת. הפרש הגובה בין מפלס המקור למפלס היעד, ועוד הפרש לחץ אם היעד לחוץ. לא תלוי בספיקה כלל.

עומד חיכוך (h_f) · friction head

החלק המשתנה. כל איבודי הזרימה בצנרת ובאביזרים. גדל בקירוב עם **ריבוע הספיקה**, ולכן הוא קטן בספיקות נמוכות ושולט בספיקות גבוהות.

נקודת עבודה · operating / duty point

החיתוך היחיד בין שני העקומים. הספיקה והעומד שבהם המשאבה תעבוד בפועל לאחר ההתקנה.

עקום המערכת: סטטי ועוד חיכוך

עקום המערכת הוא סכום של שני רכיבים בלבד, אחד קבוע ואחד שגדל עם הספיקה. ההבחנה הזו היא לב הפרק.

נוסחה 16.1 • עקום המערכת

$$H_{sys} = H_{stat} + k \cdot Q^2$$

H_{sys}	העומד שהמערכת דורשת בספיקה Q [m].
H_{stat}	עומד סטטי: הפרש גובה היעד מהמקור ועוד הפרש לחץ. קבוע, לא תלוי בספיקה.
$k \cdot Q^2$	עומד חיכוך: סך איבודי הצנרת והאביזרים. גדל עם ריבוע הספיקה (קירוב הנדסי נוח).
k	מקדם ההתנגדות הכולל של המערכת $[m / (m^3/h)^2]$. מאגד את כל הצנרת והאביזרים למספר אחד.

למה דווקא ריבוע הספיקה

כל איבודי החיכוך תלויים במהירות הזרימה בריבוע ($h \propto v^2$), והמהירות עצמה פרופורציונית לספיקה ($v = Q / A$). לכן $h_f \propto Q^2$. זו הסיבה שעקום המערכת הוא פרבולה שצומחת מהעומד הסטטי, ולא קו ישר. בספיקה כפולה, החיכוך גדל פי ארבעה. (החזקה המדויקת תלויה בשיטת החישוב: ב-2.0 Darcy בזרימה סוערת, ב-1.85 Hazen-Williams. בספר נשתמש בקירוב הנוח Q^2 אלא אם צוין אחרת.)

שתי משפחות של מערכות

צורת עקום המערכת מספרת מיד מה אופי המתקן, ויש לה השלכה ישירה על בחירת המשאבה ועל כדאיות VFD (פרק 21).

מערכת עתירת-חיכוך • עקום תלול

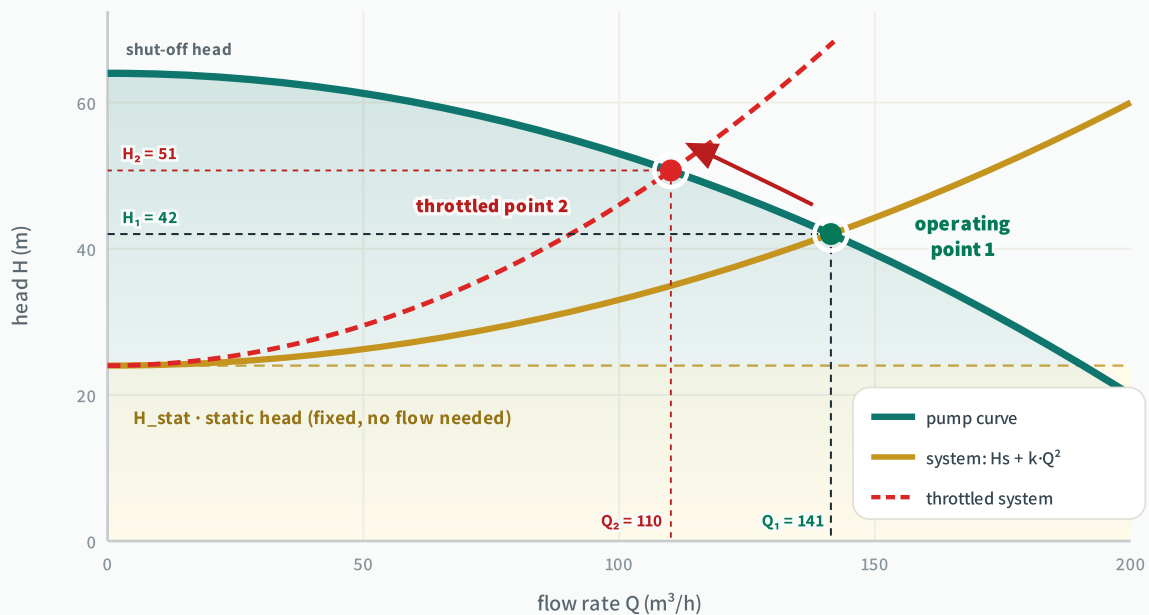
- חיכוך דומיננטי, סטטי נמוך. מערכות סינון, קווים ארוכים ודקים, מחזור.
- העקום מתחיל נמוך ומטפס בחדות עם הספיקה.
- הקטנת ספיקה חוסכת המון עומד, ולכן VFD מאוד משתלם: הקרוב ביותר לחוק החזקה השלישית (פרק 14).

מערכת עתירת-סטטי • עקום שטוח

- עומד סטטי גבוה, חיכוך נמוך. קידוח עמוק, הרמה למגדל מים, מילוי מאגר עילי.
- העקום כמעט שטוח, מתחיל גבוה ועולה לאט.
- הקטנת ספיקה כמעט לא חוסכת עומד, ולכן חיסכון VFD מוגבל: רוב העבודה מושקעת בהרמה הקבועה.

המפגש: נקודת העבודה

הדרך הטובה ביותר להבין את נקודת העבודה היא לצייר את שני העקומים יחד. עקום המשאבה יורד מ-shut-off, עקום המערכת עולה מהעומד הסטטי, והם נחתכים פעם אחת. מנקודה זו מורידים אנך לצייר Q כדי לקרוא את הספיקה, ואנך לצייר H כדי לקרוא את העומד.



איור 16.1 · נקודת העבודה היא החיתוך היחיד בין עקום המשאבה (טורקיז, יורד) לעקום המערכת (זהב, פרבולה שצומחת מרצועת העומד הסטטי המוצללת). שניקת שסתום מוסיפה חיכוך, מתלילה את עקום המערכת (אדום מקווקו), ומחליקה את הנקודה למעלה ושמאלה לאורך עקום המשאבה: פחות ספיקה ($Q_2 = 110 < Q_1 = 141$), יותר עומד מבוזבז על השסתום ($H_2 = 51 > H_1 = 42$). אותו עקום משאבה, מערכת שונה.

סכמטי · להמחשת המפגש והשפעת השניקה

איך מזיזים את נקודת העבודה

נקודת העבודה זזה כשאחד משני העקומים זז. **שינוי במערכת** (פתיחה/סגירה של שסתום, סתימה, שינוי מפלס מקור) מזיז את עקום המערכת והנקודה נעה לאורך עקום המשאבה. **שינוי במשאבה** (VFD, קיצוץ מאיץ, פרק 14) מזיז את עקום המשאבה והנקודה נעה לאורך עקום המערכת. אלה שתי הדרכים היחידות, וכל ויסות ספיקה הוא אחת מהן.

חישוב עומד החיכוך

עומד החיכוך הוא הסכום של שני סוגי איבודים: איבוד לאורך הצינור הישר (major loss) ואיבודי אביזרים מקומיים (minor loss). שתי נוסחאות נפוצות לאיבוד לאורך הצינור: Darcy-Weisbach (כללית, מדויקת, לכל נוזל) ו-Hazen-Williams (פשוטה יותר, נפוצה למים).

Darcy-Weisbach · הנוסחה הכללית

זו הנוסחה הבסיסית והנכונה ביותר פיזיקלית. היא עובדת לכל נוזל ולכל משטר זרימה, במחיר של צורך במקדם חיכוך f שתלוי בזרימה.

$$h_f = f \cdot (L / D) \cdot v^2 / (2g)$$

f	מקדם חיכוך Darcy, חסר-יחידות. נקרא מדיאגרמת Moody לפי Re וחספוס יחסי ε/D .
L, D	אורך הצינור וקוטרו הפנימי [m]. היחס L/D הוא מספר האורכים.
v	מהירות הזרימה הממוצעת [m/s]. $v = Q / A = 4Q / (\pi D^2)$.
$2g$	$19.62 \text{ m/s}^2 = 2 \times 9.81$. הופך אנרגיה קינטית לעומד מטרים (ראש מהירות).

דיאגרמת Moody בקצרה

מקדם החיכוך f תלוי במספר ריינולדס $Re = v \cdot D / \nu \approx 1.0 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ (למים ב-20°C) ובחספוס היחסי. בזרימה למינרית ($Re < 2300$, נדיר במים) $f = 64/Re$. בזרימה סוערת ($Re > 4000$, המצב הרגיל בקווי מים) קוראים את f מדיאגרמת Moody, בדרך כלל בטווח 0.015–0.04. לצינור חלק במשטר טיפוסי, ערך התחלתי סביר הוא $f \approx 0.02$.

Hazen-Williams • הקיצור למים

למים בטמפרטורת חדר, מהנדסים רבים מעדיפים את Hazen-Williams. היא מוותרת על דיאגרמת Moody ומחליפה את f במקדם C אחד שתלוי רק בחומר הצינור ובמצבו. נוחה מאוד לחישוב ידני ולעקום מערכת.

$$h_f = 10.67 \cdot L \cdot Q^{1.852} / (C^{1.852} \cdot D^{4.87})$$

C	מקדם Hazen-Williams, חסר-יחידות. תלוי בחומר הצינור ובמצבו (טבלה 16.2). גבוה = חלק.
Q	הספיקה [m³/s] בנוסחה זו. שים לב ליחידות: לא m³/h.
L, D	אורך וקוטרו פנימי [m]. שים לב לחזקה החזקה: $D^{4.87} \Leftarrow$ הקוטר הוא הפרמטר הרגיש ביותר.
10.67	קבוע יחידות ה-SI של הנוסחה.

הקוטר הוא המלך

שים לב לחזקה $D^{4.87}$ בנוסחה. **הכפלת הקוטר מקטינה את החיכוך פי כ-29**. הגדלת קוטר צינור היניקה או הסניקה היא הדרך הזולה והיעילה ביותר להוריד עומד חיכוך, להחליק את עקום המערכת ולחסוך אנרגיה לאורך כל חיי המתקן. בתכן חדש, רוחב הצינור משלם את עצמו תוך שנים בודדות. אל תחסוך באינטש הזה.

איבודי אביזרים • שיטת מקדם K

מעבר לחיכוך הצינור הישר, כל מרפק, הסתעפות, שסתום, מגוף ומסנן גובה "מס" אנרגיה מקומי. מחשבים אותם בשיטת **מקדם K**: כל אביזר מוסיף איבוד פרופורציוני לראש המהירות.

$$h_{\text{minor}} = K \cdot v^2 / (2g) \quad \cdot \quad h_{\text{fittings}} = (\sum K) \cdot v^2 / (2g)$$

K מקדם האיבוד של האביר, חסר-יחידות (טבלה 16.1). ברז סגור-חלקית K גדל בחדות.
 $\sum K$ סכום המקדמים של כל האבירים בקו. מחברים את כולם ומכפילים בראש מהירות אחד.
 $v^2/2g$ ראש המהירות, אותו אחד מ-Darcy. מאחד את כל האיבודים לאותה מטבע.

טבלה 16.1 • מקדמי איבוד K לאבירים נפוצים (כלי עזר)

אביר	שיפוט K	אביר	שיפוט K
כניסה מהמאגר (חדה)	0.5	שסתום אל-חוזר (check valve)	2.0–2.5
כניסה מעוגלת	0.05	מגוף טריז פתוח (gate, open)	0.15
מרפק 90° רגיל	0.75	שסתום גלוב פתוח (globe, open)	6.0–10
מרפק 90° רחב-רדיוס	0.45	שסתום פרפר פתוח (butterfly)	0.6–1.2
מרפק 45°	0.4	מסנן / מסננת (strainer)	2.0–3.0
הסתעפות T זרימה ישרה	0.4	מד מים / מד ספיקה	3.0–7.0
הסתעפות T זרימה צידית	1.0–1.8	יציאה למאגר (חופשית)	1.0

ערכים מייצגים לפי Hydraulic Institute / Crane TP-410; משתנים מעט בין יצרנים וקטרים. למגוף ויסות במצב שניקה, K אינו קבוע אלא מטפס מ-0.2~ (פתוח) עד >100 (כמעט סגור), וזה בדיוק מה שמתליל את עקום המערכת בשניקה.

טבלה 16.2 • מקדם Hazen-Williams C לחומרי צינור נפוצים (כלי עזר)

חומר הצינור	C (חדש)	C (ישן/בלאי)	הערה
PVC / פוליאתילן (PE)	150	140	חלק מאוד, איבוד נמוך, נפוץ בקווי מים
פלדה מצופה מלט (cement-lined)	140	120	נפוץ בקווי הולכה ראשיים
יצקת (ductile iron)	130	100	יורד עם השנים בגלל שקיעת אבנית ומינרלים
בטון (concrete)	130	120	תלוי בגימור הפנים
פלדה לא מצופה	120	90	חלודה מורידה את C משמעותית
פלדה במצב קורוזיה מתקדם	100	65–80	איבוד גבוה, חשוד מרכזי לירידת ספיקה

תחנת שאיבה דוחפת מים ממאגר תחתון אל מאגר עליו. הפרש הגובה בין מפלסי המים הוא 42 m. קו הסניקה הוא צינור PVC חדש ($C = 150$) באורך 320 m וקוטר פנימי 150 mm. לאורך הקו, מהמאגר ועד היציאה, יש כניסה חדה, שני מרפקי 90° , שסתום אל-חוזר, מגוף פתוח ויציאה. נחשב את עקום המערכת, ונמצא את נקודת העבודה מול משאבה שעומה נתון.

$$C = 150 \text{ (PVC חדש)} \quad L = 320 \text{ m}, D = 0.150 \text{ m} \quad H_{\text{stat}} = 42 \text{ m}$$

$$Q_{\text{duty}} \approx 90 \text{ m}^3/\text{h} \text{ (נקודת הבדיקה)} \quad \Sigma K = 0.5 + 2(0.75) + 2.2 + 0.15 + 1.0 = 5.35$$

1 מהירות הזרימה ב- $90 \text{ m}^3/\text{h}$ ($= 0.025 \text{ m}^3/\text{s}$) בצינור 150 mm:

$$v = 4Q / (\pi D^2) = 4 \cdot 0.025 / (\pi \cdot 0.150^2) = 1.41 \text{ m/s}$$

2 חיכוך הצינור (Hazen-Williams, נוסחה 16.3) ב- $Q = 0.025 \text{ m}^3/\text{s}$:

$$h_{\text{pipe}} = 10.67 \cdot 320 \cdot 0.025^{1.852} / (150^{1.852} \cdot 0.150^{4.87}) = 3.5 \text{ m}$$

3 איבודי אביזרים (נוסחה 16.4):

$$h_{\text{fit}} = \Sigma K \cdot v^2 / 2g = 5.35 \cdot 1.41^2 / 19.62 = 0.55 \text{ m}$$

4 עומד חיכוך כולל בנקודה זו: $h_f = 3.5 + 0.55 \approx 4.1 \text{ m}$

5 העומד שהמערכת דורשת (נוסחה 16.1):

$$H_{\text{sys}} = H_{\text{stat}} + h_f = 42 + 4.1 = 46.1 \text{ m}$$

6 מקדם ההתנגדות לעקום הפרבולה $H = 42 + k \cdot Q^2$:

$$k = h_f / Q^2 = 4.08 / 90^2 = 5.0 \times 10^{-4}$$

תוצאה: עקום המערכת הוא $H = 42 + 5.0 \times 10^{-4} \cdot Q^2$. אם עקום המשאבה חוצה אותו ב- $Q \approx 90$ m^3/h , נקודת העבודה היא $90 \text{ m}^3/\text{h} @ 46.1 \text{ m}$. שים לב: מתוך 46.1 m עומד, 42 m הם הרמה מועילה ורק 4.1 m (כ-9%) הם "מס חיכוך". זו מערכת עתירת-סטטי בריאה: כמעט כל האנרגיה הולכת להרמה, לא לחיכוך.

ומה אם שונקים מגוף עד $K = 60$? איבוד השניקה לבדו מוסיף $60 \cdot 1.41^2 / 19.62 = 6.1$ m. עקום המערכת מתליל, נקודת העבודה מחליקה למעלה-שמאלה (איור 16.1), הספיקה יורדת לכ- $78 \text{ m}^3/\text{h}$, והמשאבה דוחפת לעומד גבוה יותר.

העומד שהשניקה הוסיפה, כ-6 מטרים בספיקת הבדיקה (וכ-4.5 מטרים בנקודת העבודה החדשה), הוא אנרגיה שהמשאבה מייצרת והשסתום שורף לחום, בלי שום תועלת. זה הבזבז של ויסות בשניקה, והוא

למה הצנרת מזדקנת ומה זה עושה לנקודה

מקדם C של צינור פלדה יורד עם השנים בגלל חלודה ושקיעת מינרלים. כש-C יורד, מקדם החיכוך k עולה, עקום המערכת מטפס, נקודת העבודה מחליקה שמאלה והספיקה יורדת, בדיוק כמו שניקת שסתום אך לאט ובהדרגה. לעיתים קרובות "המשאבה נחלשה" היא בעצם **הצנרת שהזדקנה**. בבדיקת שדה חשוב להפריד בין השניים: ירידת ספיקה עם עומד יציב מצביעה על המשאבה; ירידת ספיקה עם עליית לחץ הסניקה מצביעה על המערכת (פרק 25). לכן בתכן חדש מומלץ לתכנן ל-C עתידי (ישן), לא רק ל-C של היום.

מציאת נקודת העבודה בפועל

בעבודה ידנית מוצאים את נקודת העבודה גרפית: משרטטים את שני העקומים וקוראים את החיתוך. בתוכנה פותרים את המשוואה $H_{\text{pump}}(Q) = H_{\text{stat}} + k \cdot Q^2$ נומרית (חיתוך עקום המשאבה המאינטרפול עם הפרבולה). כך או כך, ארבעה צעדים מובילים לתשובה.

1 חשב את העומד הסטטי

הפרש מפלסי המים מקור $\Leftarrow$ יעד, ועוד הפרש לחץ אם היעד לחוץ. זה הבסיס הקבוע של עקום המערכת.

2 בנה את עומד החיכוך

חבר חיכוך צינור (Darcy או Hazen-Williams) ועוד איבודי אביזרים (ΣK). חשב בכמה ספיקות כדי לקבל פרבולה.

3 צייר את שני העקומים יחד

עקום המערכת (עולה) ועקום המשאבה מהיצרן (יורד) על אותם צירים Q-H.

4 קרא את החיתוך

הספיקה והעומד בנקודת המפגש הם נקודת העבודה. ודא שהיא קרובה ל-BEP של המשאבה (פרק 17).

בדיקות שפיות לפני שמאמינים לנקודה

- נקודת העבודה קרובה ל-BEP? רחוק מ-BEP $\Rightarrow$ נצילות נמוכה, רעידות ובלאי (פרק 17). שאף ל-85-110% מ- Q_{BEP} .
- המהירות בצינור סבירה? 0.9-2.5 m/s בקווי מים. מתחת לכך $\Rightarrow$ שקיעת מוצקים; מעליה $\Rightarrow$ חיכוך מוגזם ופטיש מים.
- העומד הסטטי נכון בכל התרחישים? מפלס מקור נמוך בקיץ או מאגר יעד מלא מעלים את H_{stat} ומזיזים את הנקודה.
- חשבת על הזדקנות הצנרת? תכנן ל-C עתידי (ישן), לא רק ל-C של היום, אחרת המתקן "ייחלש" עם השנים.

אז מה? המשאבה והמערכת מחליטות יחד, ונקודת העבודה היא ההסכם ביניהן. צייר תמיד את עקום המערכת, סטטי ועוד חיכוך, לפני שאתה בוחר משאבה או מאבחן ירידת ספיקה. עקום שטוח (עתיר-סטטי) מספר שחיסכון VFD מוגבל; עקום תלול (עתיר-חיכוך) מספר שהוא זהב. וכשמישהו שונק שסתום כדי "להוריד ספיקה", הוא לא חוסך אנרגיה, הוא מבזבז אותה כחום על השסתום. עשרים דקות שרטוט של שני עקומים חוסכות בחירה שגויה של משאבה ושנים של חשבון חשמל מנופח.

קישורים בספר

חיכוך וברנולי שמאחורי $v^2/2g$ נדונו בפרק 2, ועקומות המאפיין של המשאבה בפרק 13. את נקודת העבודה הזו נשתמש כדי לבחור משאבה שלמה ל-BEP בפרק 17, ולחבר משאבות במקביל ובטור כשעקום אחד לא מספיק בפרק 18. הבזבז של ויסות בשניקה מול VFD הוא לב פרק 21, ויסות ספיקה.

17 בחירת משאבה לפי נקודת תפעול

Pump Selection by Duty Point

בקצרה

בחירת משאבה היא לא "כמה שיותר גדולה ליתר ביטחון". היא **התאמה מדויקת** בין מה שהמערכת דורשת לבין הנקודה שבה משאבה מסוימת נותנת את הביצועים האלה בנצילות הגבוהה ביותר. מטרת העל פשוטה: שנקודת התפעול תיפול **קרוב ל-BEP**, בתוך טווח העבודה המומלץ.

הפרק נותן תהליך מסודר של חמישה שלבים, מרשימת נתוני התכנון ועד גודל המנוע ושיקול ממיר התדר. בדרך הוא מתעכב על השגיאה היקרה ביותר בשטח, "**כרית הביטחון**" המוגזמת שדוחפת את המשאבה שמאלה מ-BEP ושורפת חשמל כל ימי חייה, ועל ארבע אחיותיה.

למה הבחירה מתחילה בנקודה אחת

משאבה לא קונים לפי קוטר, משקל או מחיר. קונים אותה לפי נקודה אחת על מישור הספיקה-עומד, ומכל השאר נגזר.

כל מה שלמדנו עד כאן מתכנס לרגע הזה. עקום המשאבה (פרק 13) אומר מה המשאבה יכולה לתת. עקום המערכת (פרק 16) אומר מה המתקן *דורש*. נקודת החיתוך ביניהם היא **נקודת התפעול** (*duty point / operating point*), וזו הנקודה היחידה שבה המשאבה הזו תעבוד בפועל במתקן הזה. בחירה טובה היא, בבסיסה, להביא משאבה שנקודת החיתוך שלה תנחת בדיוק במקום הנכון על העקום שלה, ליד ה-BEP.

למה דווקא ליד ה-BEP? כי שם, ובמידה רבה רק שם, המשאבה רגועה. הזרימה נכנסת ויוצאת מהמאיץ בזוויות שלשמן הוא תוכנן, העומס הרדיאלי מינימלי (פרק 5), הנצילות בשיא, ה-NPSH הנדרש סביר, והרעידות נמוכות. ככל שנקודת העבודה נודדת מ-BEP, כל אלה מתדרדרים בבת אחת. לכן כל הפרק הזה הוא, בעצם, איך לוודא שהנקודה תנחת במקום הנכון.

נקודת תפעול *duty / operating point*

זוג הספיקה והעומד (Q, H) שבו המשאבה תעבוד בפועל, נקודת החיתוך של עקום המשאבה עם עקום המערכת.

BEP *Best Efficiency Point*

נקודת הנצילות המיטבית. הספיקה שבה המשאבה מגיעה לנצילות המרבית. עוגן הבחירה כולה.

טווח עבודה מומלץ *POR, Preferred Operating Range*

הקטע סביב ה-BEP, בדרך כלל עד 70% 120% מספיקת ה-BEP, שבו המשאבה עובדת ביעילות ובאמינות. מעבר לו, בלאי ורעידות.

תהליך הבחירה בחמישה שלבים

בחירה טובה היא רצף החלטות מסודר, לא ניחוש מושכל. כל שלב מצמצם את מרחב האפשרויות עד שנשארת משאבה אחת או שתיים. נעבור עליהם אחד-אחד, ואז נדגים את כולם על מקרה אמיתי.

1 הגדר את נקודת התכן ואת תנאי הנוזל

ספיקת תכן Q, עומד מערכת H באותה ספיקה (פרק 16), ולצדם הנוזל: טמפרטורה, מליחות וצמיגות, מתח האתר וזמינות החשמל, והדרישה הרגולטורית. בלי הנתונים האלה אי אפשר לבחור, רק לנחש.

2 קבע מרווח בתבונה, לא ערימת הנחות

הוסף מרווח קטן ומחושב לעומד ולספיקה אם יש אי-ודאות אמיתית, אבל אל תערום מרווח על מרווח. מרווח מוגזם דוחף את נקודת העבודה שמאלה מ-BEP ושורף חשמל לנצח.

3 בחר משאבה שה-BEP שלה ליד הנקודה

חפש דגם שעקומו חוצה את נקודת התכן כשהיא יושבת בטווח עד 110% 85% מספיקת ה-BEP, ובתוך ה-POR. לא בקצה הימני או השמאלי של העקום.

4 ודא NPSH

בדוק ש- $NPSH_a > NPSH_r \times 1.3$ בנקודת העבודה הגרועה ביותר, בטמפרטורה הגבוהה ובמפלס המקור הנמוך (פרק 15). שלב חובה, לא המלצה.

5 קבע את גודל המנוע ושקול ממיר תדר

הספק מנוע $P_{\text{motor}} \geq P_{\text{shaft}} \times 1.15$, בחר מחלקת נצילות IE (פרק 19), ובחן אם ממיר תדר (פרק 21) משתלם כשהביקוש משתנה.

שלב 1 • נתוני התכן: רשימת תיוג לפני שמתחילים

זו נקודת הכשל הנפוצה ביותר. מהנדס מקבל "צריך משאבה ל-50 קוב בשעה" ורץ לבחור, בלי לשאול על איזה עומד, באיזו טמפרטורה ובאיזה מתח. כל אחד מהפרטים החסרים האלה יכול להפוך בחירה נכונה לשגויה. לפני שנוגעים בקטלוג, ממלאים את הרשימה הבאה במלואה.

נתון	סימון	למה זה משנה את הבחירה
ספיקת תכן	Q	הציר האופקי של הנקודה. קובע את גודל המשאבה ואת מיקום ה-BEP הרצוי.
עומד מערכת בספיקה זו	H	הציר האנכי. מגיע מעקום המערכת (פרק 16), לא מניחוש. סטטי ועוד חיכוך.
טמפרטורת הנוזל	T	מורידה את NPSHa (פרק 15) ומשנה צמיגות וצפיפות. קריטית מעל 40°C.
מליחות / סוג הנוזל	–	קובעת חומרים, אטמים וטבעות (פרק 9). מי קידוח מליחים ≠ מי שתייה.
צמיגות	v	נוזל צמיג מזיז את העקום ומפיל נצילות. למים זניח, לבוצה לא.
מתח האתר וזמינות חשמל	U	מ"ג מול מ"נ. קובע מנוע, עלות חשמל (0.40 ש"ח מול 0.50 kWh/ש"ח, ללא מע"מ) וכדאיות VFD.
NPSH זמין באתר	NPSHa	גובה המקור, החיכוך והטמפרטורה. מסנן החוצה משאבות תאבות-יניקה.
משטר הפעלה	h/yr	שעות שנתיים ושינוי ביקוש. מכריע בין מהירות קבועה ל-VFD ובמשקל הנצילות.
סף רגולטורי	η_{min}	משרד האנרגיה: 65% למשאבה שטחית, 55% למשאבת בור (פרק 4). נצילות כוללת, לא של המשאבה.

העומד הוא של המערכת, לא של המשאבה

טעות נפוצה: לקחת את העומד מהשלט של המשאבה הישנה. העומד הנכון לבחירה הוא מה שהמערכת דורשת בספיקת התכן, כלומר העומד הסטטי (הפרש מפלסים ולחץ יעד) ועוד איבודי החיכוך בספיקה הזו, מעקום המערכת של פרק 16. משאבה שנבחרה לפי שלט ישן עלולה לפספס את הנקודה לגמרי אם הצנרת או מפלס המקור השתנו.

שלב 2 • המרווח: ידיד במנות קטנות, אויב בערימות

מרווח ביטחון הוא לגיטימי ולעיתים הכרחי. מפלס מקור עשוי לרדת בקיץ, צנרת מתבלה ומגדילה חיכוך עם השנים, ומדידת השדה עצמה אינה מדויקת לחלוטין. תוספת קטנה ומחושבת לעומד או לספיקה היא הנדסה טובה. הבעיה מתחילה כשמוסיפים מרווח על מרווח: מרווח לעומד, מרווח לספיקה, ועוד "טיפה ליתר ביטחון" מכל גורם בשרשרת. כל תוספת נראית זהירה, אבל הן מצטברות.

התוצאה היא משאבה גדולה בהרבה מהצורך. כשהיא מותקנת על מערכת אמיתית, נקודת החיתוך נופלת **שמאל ל-BEP**, בעומד גבוה מהדרוש ובספיקה נמוכה מהאופטימום. שם הנצילות נמוכה, העומס הרדיאלי גבוה, האטמים והמסבים נשחקים מהר, ובמערכות בלא מאגר נסגר השסתום חלקית כדי "לשנוק" עומד עודף, מה ששורף עוד אנרגיה. המשאבה תעבוד, אבל היא תשלם על המרווח המיותר בחשמל ובאחזקה כל יום, במשך עשרים שנה.

"כרית הביטחון" שהורגת נצילות

זו השגיאה היקרה ביותר בכל הפרק. מרווח נכון הוא **מספר אחד, קטן ומחושב**, שמכסה את אי-הוודאות האמיתית. הוא אינו ערימה של הנחות פסימיות שכל אחת מגדילה את המשאבה. כלל אצבע: אם סך המרווחים על העומד עובר 15%–10%, עצור ושאל אילו מהם באמת מוצדקים. עדיף משאבה מדויקת עם ממיר תדר שיכסה אי-ודאות עתידית (שלב 5), מאשר משאבה גדולה שתעבוד שנוקה לנצח.

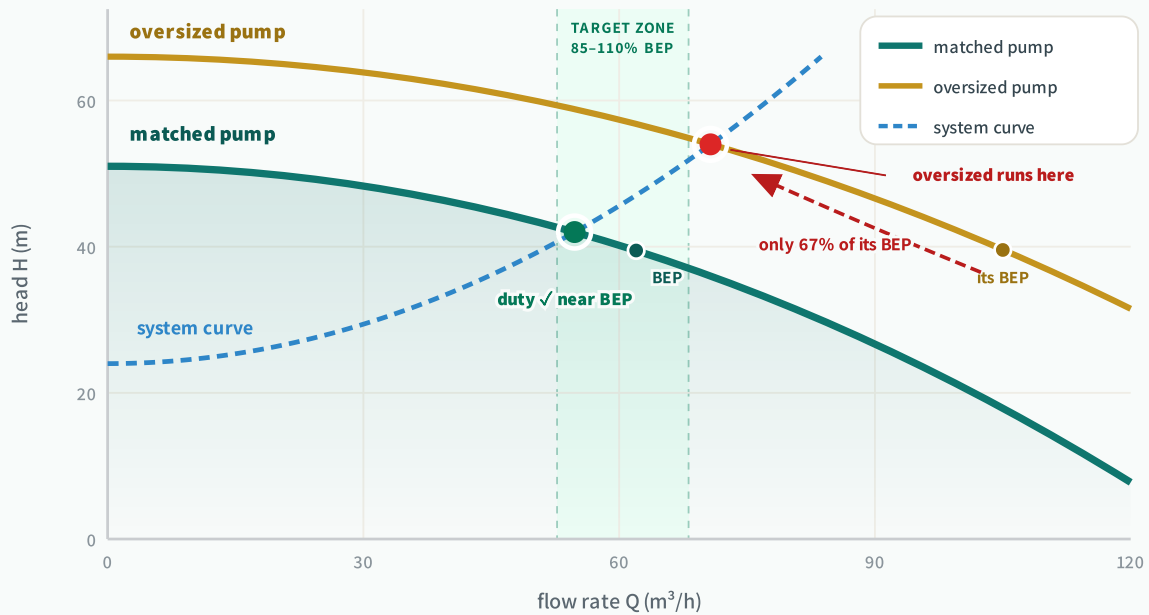
שלב 3 • ההתאמה ל-BEP: לאן צריכה הנקודה לנחות

אחרי שיש נקודת תכן וגודל מרווח שפוי, מחפשים בקטלוג דגם שעקומו עובר דרך הנקודה, אבל לא בכל מקום על העקום. המטרה היא שנקודת התכן תיפול בקטע הנכון, ביחס לספיקת ה-BEP של אותו דגם. הטבלה הבאה מתרגמת את היחס Q/Q_{BEP} להמלצה מעשית.

טבלה 17.2 • מיקום נקודת התפעול ביחס ל-BEP (כלי עזר)

מה זה אומר	מצב	Q / Q_{BEP}
משאבה גדולה מדי. רה-סירקולציה, רעידות, בלאי. להימנע.	רחוק משמאל	< 0.60
בטוח אך נצילות פחותה. מקובל רק אם הביקוש צפוי לעלות.	משמאל ל-BEP	$0.60-0.85$
היעד. נצילות מרבית, עומס מינימלי, חיים ארוכים.	בול ב-BEP ✓	$0.85-1.10$
נצילות עדיין סבירה, אך בדוק NPSH בקפידה (שלב 4).	מימין ל-BEP	$1.10-1.20$
מעבר ל- Q_{max} . סיכון קוויטציה, בלאי מאיץ. להימנע.	רחוק מימין	> 1.20

שים לב לאסימטריה. הקטע הבטוח נוטה מעט שמאלה: עדיף לפספס לכיוון של ספיקה מעט נמוכה (משמאל ל-BEP) מאשר לכיוון ספיקה גבוהה, כי מימין ל-BEP ה-NPSH הנדרש מטפס מהר והמשאבה מתקרבת לקוויטציה. לכן היעד המעשי הוא **עד 85% מ-BEP**, עם נטייה קלה להעדיף את החצי השמאלי של הטווח כשצריך להכריע.



איור 17.1 · אותה מערכת (כחול מקווקו), שתי בחירות. המשאבה המותאמת (טורקיז) חוצה את עקום המערכת בנקודה הירוקה, ב-88% מספיקת ה-BEP שלה, בלב רצועת היעד הירוקה (85–110%). המשאבה העודפת (זהב) גבוהה בהרבה: היא אמנם מזרימה יותר, אך הנקודה האדומה שלה יושבת רק ב-67% מה-BEP שלה, הרחק משמאל (החץ האדום). שתיהן "עומדות בעומד", אך רק הראשונה תעבוד יעיל; העודפת תרוץ שנוקה, רועדת ובזבזנית, כל ימי חייה.

ברוח דוגמה 17.1 · נקודת תכן $55 \text{ m}^3/\text{h}$ @ 42 m · המותאמת ב-88% BEP, העודפת ב-67%

שלב 4 · אימות NPSH: שלב חובה, לא נחמד-לדעת

אחרי שמצאנו דגם שנקודת התכן נופלת בו ליד ה-BEP, בודקים שהמתקן בכלל יכול להזין אותו בלי קוויטציה. כאן חוזרים לפרק 15: משווים את ה-NPSH הזמין שהמערכת מספקת (NPSHa) מול ה-NPSH הנדרש שהיצרן מפרסם לאותו דגם בנקודת התכן (NPSHr), ודורשים מרווח בריא.

נוסחה 17.1 · תנאי הקבלה ל-NPSH

$$\text{NPSHa} \geq \text{NPSHr} \times 1.3 \quad \text{או} \quad \text{NPSHa} - \text{NPSHr} \geq 0.6 \text{ m}$$

NPSHa מה שהמערכת מספקת בכניסה, בנקודה הגרועה ביותר: ספיקה גבוהה, טמפרטורה גבוהה, מפלס מקור נמוך (פרק 15).

NPSHr מה שהמשאבה דורשת בספיקת התכן, מעקום ה-NPSHr של היצרן. עולה עם הספיקה.
 $\times 1.3$ מרווח ביטחון מומלץ על-ידי Hydraulic Institute לרוב יישומי המים. נזל חם או משאבה גדולה דורשים יותר.

מתי NPSH פוסל דגם שהתאים ל-BEP

קורה לעיתים שדגם נופל יפה ליד ה-BEP אבל ה-NPSHr שלו גבוה מדי לאתר. אז הוא **נפסל**, גם אם הנצילות מצוינת. במקרה כזה חוזרים לשלב 3 ובוחרים דגם עם עין יניקה גדולה יותר או מהירות סיבוב נמוכה יותר (NPSHr קטן יותר), או דגם דו-יניקה שמחלק את הספיקה לשתי עיניים (פרק 5). אל תתפשר על NPSH כדי לשמור על דגם אהוב, הקוויטציה לא תתפשר אתך.

שלב 5 • גודל המנוע ושיקול ממיר התדר

הנקודה נבחרה והמשאבה אושרה הידראולית. נותר לתת לה מנוע. גודל המנוע נגזר מהספק הציר הנדרש בנקודת העבודה, ועליו מוסיפים מרווח כדי שהמנוע לא יעבוד בקצה יכולתו ויעמוד גם בעומס הגבוה ביותר על העקום.

נוסחה 17.2 • גודל המנוע

$$P_{\text{motor}} \geq P_{\text{shaft}} \times 1.15 \quad | \quad P_{\text{shaft}} = (Q \cdot H) / (367 \cdot \eta_{\text{pump}})$$

P_{shaft} הספק הציר הנדרש [kW]. ההספק ההידראולי $Q \cdot H / 367$ חלקי נצילות המשאבה. מרווח של 15%, נפוץ למשאבות מים. בדוק שהמנוע מכסה גם את ההספק המרבי לאורך העקום, לא רק בנקודת התכן.
η_{pump} נצילות המשאבה בנקודת העבודה (לא נצילות המנוע). הקבוע 367 ממיר $\text{m}^3/\text{h} \cdot \text{m} \rightarrow \text{kW}$.

שני קצוות, שתי טעויות

מרווח של פחות מ-10% מסוכן: עומס יתר רגעי, התחממות וניתוקי תרמיק. מרווח של מעל 50% ($P_{\text{motor}} > P_{\text{shaft}} \times 1.5$) בזבזני: מנוע גדול עובד בעומס חלקי, ושם הנצילות שלו נופלת ומקדם ההספק צונח, מה שגורר קנס מקדם הספק מחברת החשמל (פרק 19). השאף ל-15%-25% מרווח, ואז עגל אל המנוע הסטנדרטי הבא.

אחרי שיש גודל מנוע, בוחרים את **מחלקת הנצילות** שלו. תקן IEC 60034-30-1 מדרג מנועים יבשים מ-IE1 (בסיסי) עד IE4 (פרימיום-על), והנצילות עולה בכמה נקודות אחוז בכל מדרגה. אצל מנוע שעובד אלפי שעות בשנה, ההפרש הזה משמעותי כלכלית, וזה הנושא של פרק 19. שים לב: מנוע באר טבול אינו ניתן לדירוג IE4, התקן חל על מנועים יבשים בלבד.

השיקול האחרון הוא **ממיר תדר**. אם הביקוש קבוע, מנוע במהירות קבועה הוא הפשוט והזול. אך אם הספיקה הנדרשת משתנה לאורך היום או העונה, ממיר תדר (פרק 21) מאפשר להוריד את מהירות הסיבוב ולחסוך חשמל לפי חוקי הדמיות: הספק יורד בחזקה שלישית של המהירות, כך שירידה של 20% בספיקה חוסכת כמעט מחצית מההספק. בנוסף, ממיר תדר הוא הכיסוי הנכון לאי-ודאות עתידית, במקום משאבה גדולה מדי שתעבוד שנוקה לנצח.

תחנת הגברת לחץ במים נקיים. מעקום המערכת (פרק 16) חושבה נקודת התכן. שלושה דגמים בקטלוג עוברים בקרבת הנקודה. נבחר את הנכון לפי מיקום הנקודה ביחס ל-BEP של כל דגם.

$$\begin{aligned} \text{A: } Q_{\text{BEP}} = 38 \rightarrow Q/Q_{\text{BEP}} = 1.45 \quad H_{\text{duty}} = 42 \text{ m (מעקום המערכת)} \quad Q_{\text{duty}} = 55 \text{ m}^3/\text{h} \\ \text{C: } Q_{\text{BEP}} = 82 \rightarrow Q/Q_{\text{BEP}} = 0.67 \quad \text{B: } Q_{\text{BEP}} = 56 \rightarrow Q/Q_{\text{BEP}} = 0.98 \end{aligned}$$

1 חשב את היחס Q/Q_{BEP} לכל מועמדת:

$$A = 55/38 = 1.45 ; B = 55/56 = 0.98 ; C = 55/82 = 0.67$$

2 סווג מול טבלה 17.2:

$A \rightarrow 1.45$ (רחוק מימין, פסול) ; $B \rightarrow 0.98$ (✓-BEP-בול ב) ; $C \rightarrow 0.67$ (משמאל, נצילות פחותה)

3 בחר את B ובדוק NPSH בנקודת התכן (שלב 4):

$$NPSH_a = 7.8 \text{ m} , NPSH_{r_B} = 4.6 \text{ m} \rightarrow 7.8/4.6 = 1.70 \geq 1.3 \quad \checkmark$$

4 בחר גודל מנוע ל-B עם $\eta_{\text{pump}} = 76\%$ ומרווח 15%:

$$P_{\text{shaft}} = 55 \cdot 42 / (367 \cdot 0.76) = 8.28 \text{ kW} ; \times 1.15 = 9.5 \text{ kW} \rightarrow 11 \text{ kW}$$

בחירה: **B דגם**, מנוע סטנדרטי 11 kW. הנקודה נופלת ב-98% מ-BEP, בלב ה-POR, ה-NPSH עם מרווח של 1.70, והמנוע במרווח שפוי. **זו ההתאמה, לא הגודל.**

למה לא A ולמה לא C? דגם A קטן מדי לנקודה הזו: היא נופלת ב-145% מ-BEP שלו, רחוק מימין, שם ה-NPSHr מזנק והמשאבה על סף קוויטציה ובלאי מאיץ. דגם C גדול מדי: הנקודה ב-67% מ-BEP שלו, משמאל, שם הנצילות נמוכה והעומס הרדיאלי גבוה. שניהם "יספקו 55 קוב על 42 מטר", אבל רק B יעשה זאת יעיל, שקט וארוך-חיים.

נדרש מנוע לדגם שנבחר לנקודת עבודה נתונה. נחשב את הגודל הנכון, ונראה למה לקפוץ למנוע אחד גדול יותר "ליתר ביטחון" עולה כסף.

$$Q = 50 \text{ m}^3/\text{h} \quad H = 40 \text{ m} \quad \eta_{\text{pump}} = 75\% \quad \text{h/yr שעות} = 6,000$$

(מ"ג, ללא מע"מ) $\text{kWh/תעריף} = 0.40 \text{ ש}$

1 הספק הידראולי מועיל: $P_h = Q \cdot H / 367 = 50 \cdot 40 / 367 = 5.45 \text{ kW}$

2 הספק ציר נדרש: $P_{\text{shaft}} = P_h / \eta_{\text{pump}} = 5.45 / 0.75 = 7.27 \text{ kW}$

3 הוסף מרווח 15%: $7.27 \cdot 1.15 = 8.36 \text{ kW} \rightarrow 11 \text{ מנוע סטנדרטי}$

4 השווה ל-"ליתר ביטחון" 15 kW. בעומס חלקי נמוך נצילות המנוע עלולה לרדת בנקודה-שתיים, ומקדם ההספק צונח:

$$\Delta P_1 \approx 7.27 / 0.88 - 7.27 / 0.91 = 8.26 - 7.99 = 0.27 \text{ kW}$$

בחירה: מנוע **11 kW** ולא 15 kW. ההספק הנדרש 8.36 kW יושב בנוחות במנוע 11. מנוע 15 ירוץ ב-48% מהעומס הנקוב, בנצילות ובמקדם הספק נמוכים.

כמה עולה ה"ביטחון"? אובדן הנצילות במנוע הגדול שורף בערך 0.27 kW נוספים ברצף. ב-שעות 6,000 ובתעריף 0.40 ש: $0.27 \cdot 6000 \cdot 0.40$, עד כ-650 ש בשנה, וזאת בלי לספור את קנס מקדם ההספק. על פני שנה 15 זה עד כ-10,000 ש שנשרפו רק כדי לקנות מנוע גדול מהצורך. המנוע הנכון חוסך כסף משני הקצוות, פחות לקנות, פחות להפעיל.

חמש שגיאות הבחירה הנפוצות

אחרי שראינו את התהליך הנכון, כדאי לקבע את ההפך שלו. כמעט כל בחירה שגויה בשטח נופלת לאחת מחמש המלכודות הבאות. מי שמכיר אותן בשמן מזהה אותן לפני שהן נכנסות לקטלוג הזמנה.

חמש המלכודות

- **גודל יתר (oversizing)** - משאבה גדולה "ליתר ביטחון" שתעבוד שנוקה, שמאל ל-BEP, ותשרוף חשמל לנצח.
- **עבודה רחוק מ-BEP** - נקודה בקצה הימני או השמאלי של העקום. נצילות נמוכה, רעידות, בלאי מסבים ואטמים.
- **התעלמות מעקום המערכת** - בחירה לפי שלט ישן או לפי עומד יחיד, בלי לחשב את עקום המערכת האמיתי (פרק 16).
- **דילוג על NPSH** - בחירה הידראולית מושלמת שמתעלמת מהזנת היניקה, ומקווה בקיץ או בספיקה גבוהה (פרק 15).
- **בחירה לפי מחיר רכישה בלבד** - המשאבה הזולה לקנייה היא לרוב היקרה לתפעול. החשמל מגמד את מחיר הרכישה (פרק 27).

חמש התשובות

- **התאמה, לא גודל** - נקודת תכן מחושבת, מרווח קטן ושפוי, וזהו.
- **כוון ל-POR** - 85%–110% מ-BEP, עם נטייה קלה שמאלה.
- **עקום מערכת אמיתי** - סטטי ועוד חיכוך בספיקת התכן, מפרק 16.
- **NPSH כשלב חובה** - $NPSH_a \geq NPSH_r \times 1.3$ בנקודה הגרועה.
- **חשוב במונחי מחזור חיים** - רכישה ועוד חשמל ועוד אחזקה על פני 15–20 שנה (פרק 27).

המחיר האמיתי הוא החשמל, לא הקופסה

במשאבה שעובדת אלפי שעות בשנה, עלות החשמל לאורך חייה גדולה פי כמה ממחיר הרכישה. הפרש של 3–4 נקודות נצילות, בדיוק ההפרש בין בחירה ב-BEP לבחירה שנוקה, מצטבר לעשרות אלפי שקלים על פני העשור. לכן בחירה נכונה לפי נקודת תפעול אינה רק הנדסה טובה, היא ההחלטה הכלכלית הגדולה ביותר במחזור החיים של המשאבה. את הכימות המלא של זה, עלות מחזור חיים מול מחיר רכישה, נעשה בפרק 27.

אז מה? הבחירה הנכונה היא ההתאמה, לא הגודל. חמישה שלבים מובילים אליה: נתוני תכן מלאים, מרווח קטן ומחושב, התאמה שמנחיתה את הנקודה ליד ה-BEP, אימות ה-NPSH כשלב חובה, ומנוע במרווח שפוי עם שיקול ממיר תדר. משאבה שנבחרה קרוב ל-BEP תהיה יעילה, שקטה וארוכת חיים. משאבה "ליתר ביטחון" תשלם על הכרית הזו בחשמל ובבלאי כל ימי חייה. עשרים דקות של בחירה נכונה חוסכות עשרים שנה של תפעול יקר.

קישורים בספר

עקום המשאבה שעליו יושבת נקודת התפעול נקרא בפרק 13. עקום המערכת שקובע את העומד בכל ספיקה, ונקודת החיתוך, בפרק 16. אימות ה-NPSH כשלב חובה הוא לב פרק 15. מחלקות הנצילות של המנוע IE1–IE4 וקנס מקדם ההספק בפרק 19. ממיר התדר וחיסכון האנרגיה לפי חוקי הדמיות בפרק 21. ההשוואה הכלכלית המלאה, עלות מחזור חיים מול מחיר רכישה, בפרק 27.

18 עבודה במקביל ובטור

Parallel & Series Operation

בקצרה

כשמשאבה אחת לא מספיקה, מחברים כמה יחד בשתי דרכים. **במקביל** כדי להגדיל ספיקה: כל המשאבות דוחפות לאותו קולקטור, והספיקות מתחברות באותו עומד. **בטור** כדי להגדיל עומד: היציאה של אחת מזינה את הכניסה של הבאה, והעומדים מתחברים באותה ספיקה. אבל יש כאן מלכודת תכנונית שמפילה הרבה מתקנים: **שתי משאבות במקביל כמעט אף פעם לא נותנות פי שתיים ספיקה**. עקום המערכת קובע כמה באמת מתקבל, והבנה של זה היא ההבדל בין תחנה יעילה לבין תחנה עם הרבה משאבות ומעט מים.

שתי דרכים לחבר, שתי מטרות שונות

חיבור משאבות הוא אריתמטיקה גרפית. השאלה היחידה היא מה מתחבר: הספיקות או העומדים. התשובה מכתיבה הכול.

בפרק 13 ראינו שלכל משאבה יש **עקום מאפיין** ($H-Q$ curve) שמתאר את העומד שהיא מייצרת בכל ספיקה. בפרק 16 ראינו שעקום המערכת מתאר כמה עומד נדרש כדי להזרים ספיקה נתונה. נקודת העבודה היא החיתוך ביניהם. כשמחברים שתי משאבות, אנחנו בונים **עקום משאבה משולב** חדש, ומחפשים את החיתוך שלו עם אותו עקום מערכת.

החיבור המשולב נבנה לפי כלל אחד פשוט, וכל הפרק נשען עליו:

חיבור במקביל • parallel

המשאבות יושבות זו לצד זו, יונקות ממקור משותף ודוחפות לקולקטור משותף. כולן רואות את **אותו עומד**, והספיקות שלהן **מתחברות**. משתמשים בו כדי להגדיל ספיקה, או כדי לאפשר גמישות (להפעיל משאבה אחת בביקוש נמוך, שתיים בשיא).

חיבור בטור • series

המשאבות יושבות זו אחרי זו, היציאה של הראשונה היא הכניסה של השנייה. כולן מעבירות את **אותה ספיקה**, והעומדים שלהן **מתחברים**. משתמשים בו כדי להגדיל עומד. משאבה רב-שלבית (פרק 12) היא בדיוק זה, רק בתוך גוף אחד.

היבט	מקביל (PARALLEL)	טור (SERIES)
מה מתחבר	הספיקות מתחברות (Q)	העומדים מתחברים (H)
מה משותף	עומד זהה לכל משאבה	ספיקה זהה בכל משאבה
איך בונים את העקום	חיבור אופקי (ימינה)	חיבור אנכי (למעלה)
המטרה	יותר ספיקה • גמישות • גיבוי	יותר עומד
שימוש אופייני	תחנות הרמה, אספקה עירונית, ביקוש משתנה	קווי הולכה ארוכים, קידוחים עמוקים, בוסטרים
הזהירות העיקרית	הרווח קטן מ-2 • זרימה חוזרת במשאבה חלשה	לחץ גבוה בגוף • NPSH של הדרגה השנייה

מקביל: סכימת ספיקות אופקית

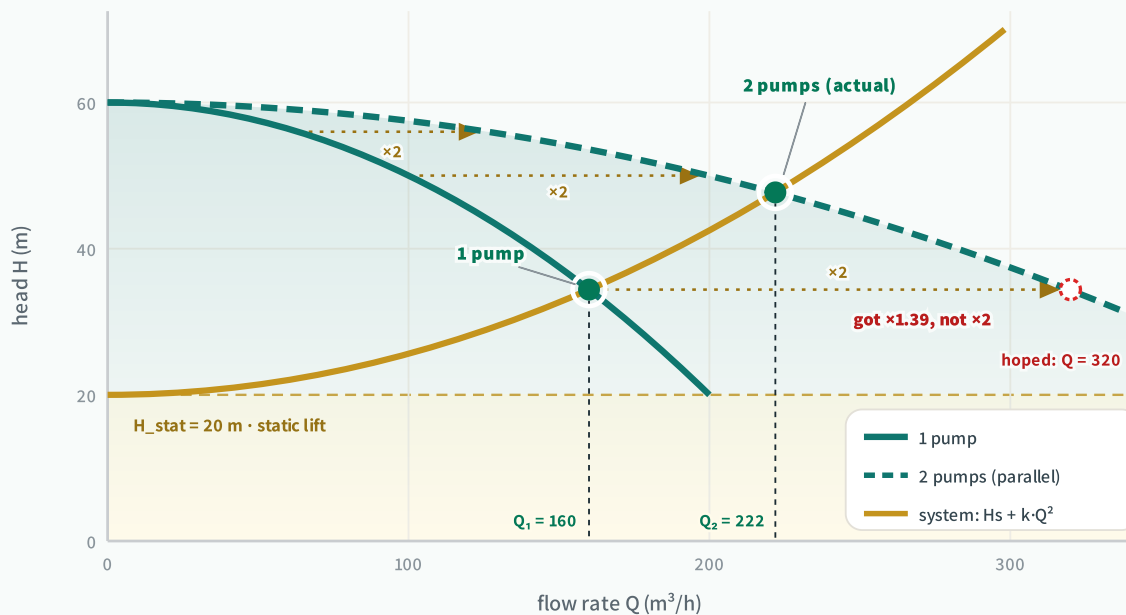
נתחיל מהמקרה הנפוץ. שתי משאבות זהות, יונקות מאותו מאגר, דוחפות לאותו קו. מכיוון שהן חולקות את אותו קולקטור, בכל רגע נתון שתייהן עובדות מול **אותו עומד בדיוק**. כדי לבנות את העקום המשולב, בוחרים ערך עומד, קוראים מהעקום של משאבה אחת איזו ספיקה היא נותנת בעומד הזה, ומכפילים בשתיים (לשתי משאבות זהות). חוזרים על כך לכל עומד. התוצאה היא עקום שנמתח ימינה: **פי שתיים ספיקה בכל עומד**.

נוסחה 18.1 • עקום מקביל

$$Q_{\text{combined}}(H) = Q_A(H) + Q_B(H)$$

H העומד המשותף לכל המשאבות [m]. **קבוע** לאורך החיבור.
Q_A(H) הספיקה שמשאבה A נותנת בעומד H, נקראת מעקום המאפיין שלה.
Q_{combined} סכום הספיקות באותו עומד. ל-n משאבות זהות: $Q = n \cdot Q_{\text{single}}(H)$.

עד כאן הכול נשמע נהדר: שתי משאבות, פי שתיים מים. אבל כאן נכנס עקום המערכת ושובר את האשליה. נקודת העבודה החדשה אינה במקום שבו העקום המשולב נמצא בעומד הישן, אלא בחיתוך שלו עם עקום המערכת. ומכיוון שעקום המערכת **טיפס** כשהספיקה גדלה (החיכוך גדל עם ריבוע הספיקה, פרק 16), נקודת העבודה החדשה נמצאת בעומד גבוה יותר ובספיקה נמוכה יותר ממה שקיווינו.



איור 18.1 · שתי משאבות זהות במקביל. חיצו ההכפלה האופקיים (זהב מנוקד) בונים את העקום המשולב (טורקיז מקווקו): בכל עומד, פי שתיים ספיקה. אבל נקודת העבודה האמיתית היא החיתוך עם עקום המערכת (זהב), שמטפס מרצועת העומד הסטטי: משאבה אחת נותנת $Q_1 = 160$, שתיים נותנות $Q_2 = 222$ ולא 320 (העיגול האדום החלול, התקווה שלא מתממשת). התוספת האמיתית: פי 1.39 בלבד.

מבוסס על דוגמה 18.1 · עומד סטטי 20 מ, מערכת בעלת חיכוך בינוני

למה התוספת תמיד קטנה מפי שתיים

כשמוסיפים משאבה שנייה, הספיקה הכוללת עולה. אבל ככל שהספיקה עולה, החיכוך בקו ההולכה גדל עם Q^2 , ולכן המערכת דורשת עומד גבוה יותר. בעומד הגבוה הזה כל משאבה בנפרד נותנת **פחות** ספיקה מאשר קודם. שתי המשאבות "מושכות" זו את זו אחורה דרך עקום המערכת המשותף. לכן הספיקה הכוללת תמיד קטנה מסכום שתי הספיקות הבודדות שכל אחת נתנה לבד.

תלול מול שטוח: מתי מקביל באמת עוזר

גודל ההפסד תלוי לחלוטין בצורת עקום המערכת, וזו אולי התובנה החשובה ביותר בפרק. אפשר לחלק מערכות לשתי משפחות:

מערכת שטוחה · מקביל יעיל

- **עומד סטטי גבוה, חיכוך נמוך** · רוב העומד הוא הרמה גיאומטרית קבועה (מאגר גבוה), וחלק קטן בלבד הוא חיכוך.
- העקום כמעט אופקי, ולכן תוספת ספיקה גדולה כמעט לא מעלה את העומד הנדרש.
- המשאבה השנייה מוסיפה כמעט את כל הספיקה שלה. **הרווח מתקרב לפי שתיים.**

מערכת תלולה · מקביל חלש

- **חיכוך דומיננטי, עומד סטטי נמוך** · קו ארוך, צר, או מלא אביזרים. רוב העומד הוא חיכוך.
- העקום מטפס בחדות, ולכן כל תוספת ספיקה "עולה" בהרבה עומד נוסף.
- המשאבה השנייה כמעט לא תורמת. **הרווח עלול להיות פי 1.2 בלבד**, ובזבוז אנרגיה גדול.

המסקנה התכנונית

במערכת עם חיכוך דומיננטי (עקום תלול), הוספת משאבה במקביל היא לרוב טעות: היא צורכת כמעט פי שניים חשמל אך מוסיפה מעט מאוד מים. הפתרון הנכון שם הוא **טור** או משאבה גדולה יותר, לא מקביל. לפני שמתקינים משאבה שנייה במקביל, חובה לשרטט את עקום המערכת ולמצוא את נקודת העבודה החדשה. אם הרווח קטן מפי 1.3, המקביל כנראה לא משתלם. **קודם משרטטים, אחר כך קונים.**

תחנת הרמה מזרימה מים ממאגר תחתון למאגר עליון. עומד ההרמה הסטטי הוא 20 m. מודדים את עקום המשאבה ואת עקום המערכת ומקבלים אותם לפרבולות. נמצא מה נותנת משאבה אחת, ומה נותנות שתיים במקביל.

$$\text{Hs} = 20 \text{ m (עומד סטטי)} \quad \text{system: } H = 20 + 0.0005625 \cdot Q^2 \quad \text{pump: } H = 60 - 0.001 \cdot Q^2$$

(לכל משאבה) $n = 2$ (משאבות זהות)

1 נקודת העבודה של משאבה אחת: משווים עקום משאבה לעקום מערכת.

$$60 - 0.001 \cdot Q^2 = 20 + 0.0005625 \cdot Q^2 \rightarrow 40 = 0.0015625 \cdot Q^2$$

2 פותרים לספיקה הבודדת:

$$Q_1 = \sqrt{40 / 0.0015625} = \sqrt{25600} = 160 \text{ m}^3/\text{h} ; H_1 = 60 - 0.001 \cdot 160^2 = 34.4 \text{ m}$$

3 עבור שתי משאבות במקביל, כל משאבה נותנת ספיקה q באותו עומד, והכולל הוא $Q = 2q$. נציב את עקום המשאבה (לכל יחידה) ועקום המערכת (לכולל):

$$60 - 0.001 \cdot q^2 = 20 + 0.0005625 \cdot (2q)^2 = 20 + 0.00225 \cdot q^2$$

4 פותרים לספיקה הבודדת q ואז לכולל:

$$40 = 0.00325 \cdot q^2 \rightarrow q = \sqrt{12308} = 110.9 \text{ m}^3/\text{h} ; Q_2 = 2q = 221.9 \text{ m}^3/\text{h}$$

5 נחשב את הרווח האמיתי ואת העומד החדש:

$$\text{gain} = Q_2 / Q_1 = 221.9 / 160 = 1.39 ; H_2 = 60 - 0.001 \cdot 110.9^2 = 47.7 \text{ m}$$

תוצאה: משאבה אחת נותנת **160 m³/h**. שתיים במקביל נותנות **222 m³/h**, לא 320. הרווח הוא פי 1.39 בלבד, וכל משאבה ירדה מ-160 ל-111 m³/h. המשאבה השנייה הוסיפה רק 62 m³/h, פחות מ-40% מספיקתה שלה.

ומה אם המערכת הייתה שטוחה? אילו החיכוך היה זניח ($k \rightarrow 0$) ועומד ההרמה כמעט כולו סטטי, עקום המערכת היה כמעט אופקי, ונקודת העבודה הייתה זזה כמעט אופקית ימינה: המשאבה השנייה הייתה מוסיפה כמעט את מלוא 160 m³/h שלה, רווח שמתקרב לפי שתיים. אותו זוג משאבות בדיוק, רק מערכת אחרת, ותוצאה שונה לגמרי.

הלקח: אי אפשר לדבר על "ספיקה של שתי משאבות" בלי לדעת את עקום המערכת. המשאבות מציעות, המערכת מחליטה.

מה קורה לנצילות ולנקודת העבודה של כל משאבה

שימו לב לפרט שקל לפספס בדוגמה: כשעברנו ממשאבה אחת לשתיים, נקודת העבודה של כל משאבה זזה שמאלה, מ-160 ל-111 m^3/h . כל משאבה עכשיו עובדת בספיקה נמוכה יותר ביחס ל-BEP שלה. אם ה-BEP היה ב-150 m^3/h , משאבה בודדת עבדה קרוב מאוד אליו, אבל בהפעלה כפולה כל משאבה רצה ב-74% מ-BEP, רחוק משמאל. שם הנצילות יורדת, העומס הרדיאלי גדל (פרקים 5 ו-8), והבלאי מואץ. **מקביל לא רק נותן פחות מפי שתיים, הוא גם דוחף כל משאבה לנקודת עבודה פחות בריאה.** זו עוד סיבה לבדוק היטב לפני שמתכננים תחנה סביב הפעלה מקבילה קבועה.

משאבות תואמות ולא-תואמות במקביל

עד כה הנחנו שתי משאבות זהות. בשטח, לעיתים קרובות מחברים במקביל משאבות שונות, למשל משאבה חדשה לצד ותיקה, או דגמים שונים שנרכשו בתקופות שונות. כאן צריך זהירות מיוחדת, כי לכל משאבה **עומד סגירה** (*shutoff head*) משלה, העומד שהיא מייצרת בספיקה אפס, בקצה השמאלי של העקום. הבעיה: שתי משאבות במקביל חולקות עומד. אם העומד המשותף בנקודת העבודה גבוה מעומד הסגירה של המשאבה החלשה, המשאבה החלשה **לא מסוגלת בכלל לדחוף** כנגד הלחץ הזה. במקרה הטוב היא תורמת אפס. במקרה הרע, הלחץ של המשאבה החזקה דוחף נוצל **אחורה דרכה**, זרימה חוזרת שמסובבת אותה לאחור או מחממת אותה, ובזבז אנרגיה כפול.

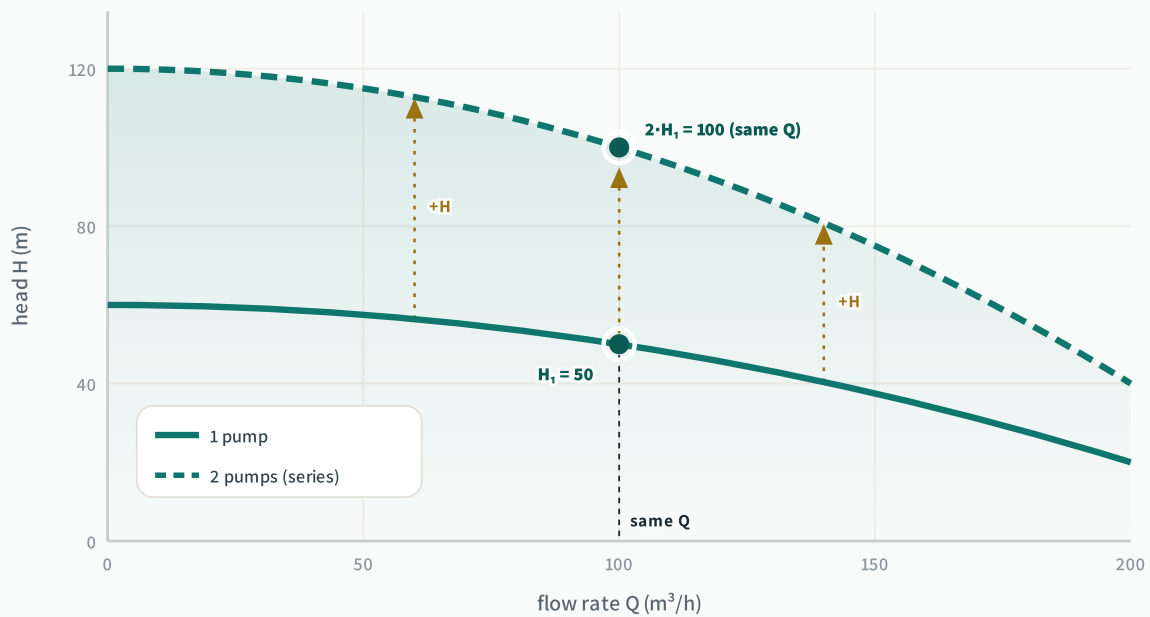
טור: סכימת עומדים אנכית

בחיבור בטור, היציאה של משאבה אחת מחוברת ישירות לכניסה של הבאה. אותה ספיקה זורמת דרך כל המשאבות בשרשרת, ולכן **הספיקה קבועה** לכל אורכה. אבל כל משאבה מוסיפה את העומד שלה על מה שכבר נצבר: הראשונה מרימה את הלחץ מ-0 ל- H_1 , השנייה מ- H_1 ל- H_1+H_2 , וכן הלאה. כדי לבנות את העקום המשולב, בוחרים ערך ספיקה, קוראים את העומד של כל משאבה בספיקה הזו, ומחברים אנכית.

נוסחה 18.2 • עקום טור

$$H_{\text{combined}}(Q) = H_A(Q) + H_B(Q)$$

Q הספיקה המשותפת, זורמת דרך כל המשאבות [m^3/h]. **קבועה** לאורך הטור.
 $H_A(Q)$ העומד שמשאבה A מייצרת בספיקה Q, נקרא מעקום המאפיין שלה.
 H_{combined} סכום העומדים באותה ספיקה. ל-n משאבות זהות: $H = n \cdot H_{\text{single}}(Q)$. זה בדיוק עקרון הדרגות במשאבה רב-שלבית (פרק 12).



איור 18.2 · שתי משאבות זהות בטור. בכל ספיקה נתונה, העומדים מתחברים אנכית (חיצי ההכפלה הזהובים): ב- $Q = 100$ כל משאבה נותנת 50 m, והטור נותן 100 m באותה ספיקה בדיוק. העקום המשולב (טורקיז מקווקו) מכפיל את העומד בכל נקודה, כולל בעומד הסגירה. זה בדיוק מה שעושה כל דרגה במשאבה רב-שלבית בתוך גוף אחד.

סכמטי · להמחשת חיבור העומדים בספיקה קבועה

טור = משאבה רב-שלבית פרוסה

אין הבדל מהותי בין שתי משאבות חד-שלביות בטור לבין משאבה דו-שלבית אחת. בשתי הצורות הספיקה קבועה והעומדים מתחברים. ההבדל מעשי בלבד: משאבה רב-שלבית (פרק 12) אורזת את הדרגות בגוף אחד עם מפזר סימטרי (פרק 5), ולכן היא קומפקטית, יעילה ואטומה יותר. חיבור בטור של משאבות נפרדות שמור למקרים שבהם צריך גמישות (להוסיף דרגה בעתיד) או כשאין משאבה רב-שלבית מתאימה במלאי.

שתי זהירויות בחיבור טור

1 לחץ גבוה בגוף המשאבה השנייה

המשאבה השנייה רואה בכניסה שלה כבר את כל הלחץ של הראשונה. הגוף, האטם ואוגני החיבור שלה חייבים לעמוד בלחץ המצטבר, לא רק בלחץ שהיא עצמה מייצרת. בחירת דירוג לחץ נמוך מדי לדרגה השנייה היא תקלה קלאסית.

2 NPSH של הדרגה הראשונה בלבד

סכנת הקוויטציה (פרק 15) קיימת בעיקר במשאבה הראשונה, היונקת מהמקור בלחץ נמוך. השנייה מקבלת נוזל בלחץ גבוה מהראשונה, ולכן ה-NPSH הזמין שלה גדול ובטוח. תכנון נכון מציב את המשאבה עם ה-NPSHr הנמוך ראשונה.

בחירה בין מקביל, טור ומשאבה גדולה

נסכם את ההחלטה לכלי עבודה אחד. כשמשאבה אחת לא מספיקה, יש שלוש דרכים להגדיל, וכל אחת מתאימה לבעיה אחרת. השאלה הראשונה היא תמיד: **חסר לי ספיקה או חסר לי עומד?**

טבלה 18.2 • מתי מקביל, מתי טור, מתי משאבה גדולה

הצורך	הפתרון המומלץ	למה	להיזהר מ
יותר ספיקה • מערכת שטוחה (עומד סטטי גבוה)	מקביל	הרווח מתקרב לפי שתיים, וגם גמישות וגיבוי	ודא שסתום אל-חוזר לכל משאבה
יותר ספיקה • מערכת תלולה (חיכוך דומיננטי)	משאבה גדולה יותר, לא מקביל	מקביל ייתן רווח זעום ויבזבז חשמל	אל תוסיף משאבה שנייה במקביל "ליתר ביטחון"
יותר עומד • אותה ספיקה	טור / רב-שלבית	העומדים מתחברים בספיקה קבועה	דירוג לחץ של הדרגה השנייה
ביקוש משתנה לאורך היממה	מקביל (כמה יחידות קטנות)	מפעילים יחידה אחת בביקוש נמוך, כמה בשיא, כל אחת קרובה ל-BEP	תיאום הפעלה והפעלה מדורגת
גיבוי / זמינות גבוהה	מקביל (N+1)	אם יחידה אחת נופלת, השאר ממשיכות	גודל כל יחידה כך ש-N מספיקות לביקוש

דגלים אדומים בתחנה מקבילה

- **הוספת משאבה שנייה כמעט לא העלתה את הספיקה** • עקום המערכת תלול מדי. המקביל לא מתאים כאן.
- **משאבה אחת חמה בלי לדחוף** • עומד הסגירה שלה נמוך מהעומד המשותף, היא מקבלת זרימה חוזרת. בדוק תאימות עקומים וסתום אל-חוזר.
- **שתי המשאבות עובדות רחוק משמאל ל-BEP** • רעידות, רעש ובלאי מסבים. שקול הפעלה של משאבה אחת בלבד בביקוש נמוך.
- **צריכת חשמל כמעט כפולה, ספיקה כמעט זהה** • הסימן הכלכלי הברור שהמקביל לא משתלם במערכת הזו.

אז מה? מקביל מוסיף ספיקה, טור מוסיף עומד, אבל עקום המערכת מחליט כמה. שתי משאבות במקביל אינן פי שתיים, והרווח האמיתי תלוי בצורת עקום המערכת: שטוח ומקביל יעיל, תלול ומקביל מבזבז. לפני כל תוספת משאבה, חוזרים לעקום המערכת מפרק 16, מוצאים את נקודת העבודה החדשה, ובודקים אם הרווח מצדיק את החשמל הנוסף. עשר דקות שרטוט מונעות תחנה עם הרבה משאבות, הרבה חשבון חשמל, ומעט מים.

קישורים בספר

עקומי המאפיין שמחברים כאן נקראים בפרק 13. עקום המערכת ונקודת העבודה, הבסיס לכל הפרק, בפרק 16. משאבה רב-שלבית, שהיא חיבור טור בתוך גוף אחד, בפרק 12. סוג הגוף והמפזר שמאפשרים הערמת דרגות בפרק 5. סכנת הקוויטציה במשאבה הראשונה של טור בפרק 15. נצילות ונקודת עבודה ביחס ל-BEP בפרק 4 ובפרק 13.



חלק שביעי

הנעה, בקרה ואנרגיה

Drives, Control & Energy

מנועים והנעה 19

המנוע לעומק: בנייה, בידוד והישרדות מול הממיר 20

ויסות ספיקה: VFD מול שניקה מול חיתוך מול עוקף 21

מעברים ובטיחות הידראולית 22

19 מנועים והנעה

Motors & Drives

בקצרה

המאיץ עושה את העבודה ההידראולית, אבל **המנוע** הוא שמספק לו את הכוח, והוא גם חצי מהנצילות הכוללת. כמעט כל משאבה בישראל מונעת ב**מנוע השראה תלת-פאזי**. שלושה גדלים מסבירים את ההתנהגות שלו: **מהירות הסינכרונית**, **ההחלקה** ועקום המומנט. דרגת הנצילות (**IE1 עד IE5**) קובעת כמה חשמל המנוע מבזבז, **מקדם ההספק** קובע אם תקבל קנס מחברת החשמל, ושיטת ההתנעה, מ-DOL ועד ממיר תדר, קובעת איך המנוע מתעורר ואם הוא חוסך אנרגיה. הפרק עונה על שאלת המיליון: **ממיר או מתנע, מה כדאי**.

מנוע ההשראה: למה הוא שולט בשטח

כ-140 שנה אחרי שהומצא, מנוע ההשראה התלת-פאזי עדיין מניע את רוב המשאבות בעולם. הסיבה פשוטה: אין בו מגעים נשחקים, הוא זול, אמין ושקט.

בליבו של מנוע ההשראה יש שני חלקים בלבד: **סטטור** (*stator*) נייח שאליו מחובר החשמל, ו**רוטור** (*rotor*) מסתובב שאליו לא מחובר דבר. הזרם התלת-פאזי בסטטור יוצר **שדה מגנטי מסתובב**, והשדה הזה משרה זרמים ברוטור, מכאן השם. אין מברשות, אין טבעות החלקה, אין קומוטטור. רכיב כמעט בלתי-מתבלה, וזו הסיבה שמנוע באר יכול לרוץ עשור מתחת לאדמה בלי שנגעו בו.

הגודל הראשון שצריך להבין הוא מהירות השדה המגנטי המסתובב, ה**מהירות הסינכרונית** (*synchronous speed*). היא נקבעת רק משני דברים: תדר הרשת ומספר הקטבים של המנוע.

נוסחה 19.1 • מהירות סינכרונית והחלקה

$$n_s = 120 \cdot f / p \quad | \quad s = (n_s - n) / n_s$$

המהירות הסינכרונית, מהירות השדה המגנטי [rpm]	n_s
תדר הרשת [Hz], בישראל ובאירופה 50 Hz, בצפון אמריקה 60 Hz	f
מספר הקטבים (תמיד זוגי): 2, 4, 6, 8...	p
ההחלקה (slip), היחס בין פיגור הרוטור למהירות הסינכרונית. בעומס מלא בדרך כלל 1%-5%.	s
המהירות בפועל של הצייר [rpm]. תמיד נמוכה מ- n_s , אחרת לא נוצר מומנט.	n

למה הרוטור חייב לפגור

אם הרוטור היה מסתובב בדיוק במהירות השדה, הוא לא היה "חותך" קווי שטף מגנטי, לא היו נוצרים בו זרמים, ולא היה נוצר מומנט. דווקא ה**פיגור** הקטן, ההחלקה, הוא שמייצר את הזרם ברוטור ואיתו את כוח הסיבוב. ככל שהעומס גדל, ההחלקה גדלה מעט, המנוע מאט קצת, ומייצר יותר מומנט. זו מערכת איזון עצמית יפהפייה. בעומס מלא מנוע משאבה טיפוסי מאבד רק 1.5%–3% מהמהירות הסינכרונית.

טבלה 19.1 • מהירות סינכרונית מול מספר קטבים (כלי עזר • רשת 50 Hz)

P קטבים	N_s (RPM)	טיפוסי בעומס N (RPM)	אופייני ל
2	3000	≈ 2900	בוסטרים, עומד גבוה, ספיקה קטנה
4	1500	≈ 1455	משאבות מים כלליות, הנפוץ ביותר
6	1000	≈ 960	ספיקה גבוהה, עומד נמוך, ביוז
8	750	≈ 730	משאבות איטיות, מאיצים גדולים

דוגמה 19.1 • מהירות סינכרונית והחלקה במנוע 4 קטבים

מנוע משאבה תקני, 4 קטבים, מוזן מרשת ישראל בתדר 50 Hz. ההחלקה הנמדדת בעומס היא 3%. מהי המהירות הסינכרונית ומהי מהירות הציר בפועל?

$$s = 3\% = 0.03 \quad p = 4 \text{ (קטבים)} \quad f = 50 \text{ Hz}$$

1 נחשב את המהירות הסינכרונית מנוסחה 19.1:

$$n_s = 120 \cdot 50 / 4 = 1500 \text{ rpm}$$

2 נחשב את מהירות הציר בפועל מההחלקה:

$$n = n_s \cdot (1 - s) = 1500 \cdot (1 - 0.03)$$

3 נקבל את המהירות הממשית: $n = 1455 \text{ rpm}$

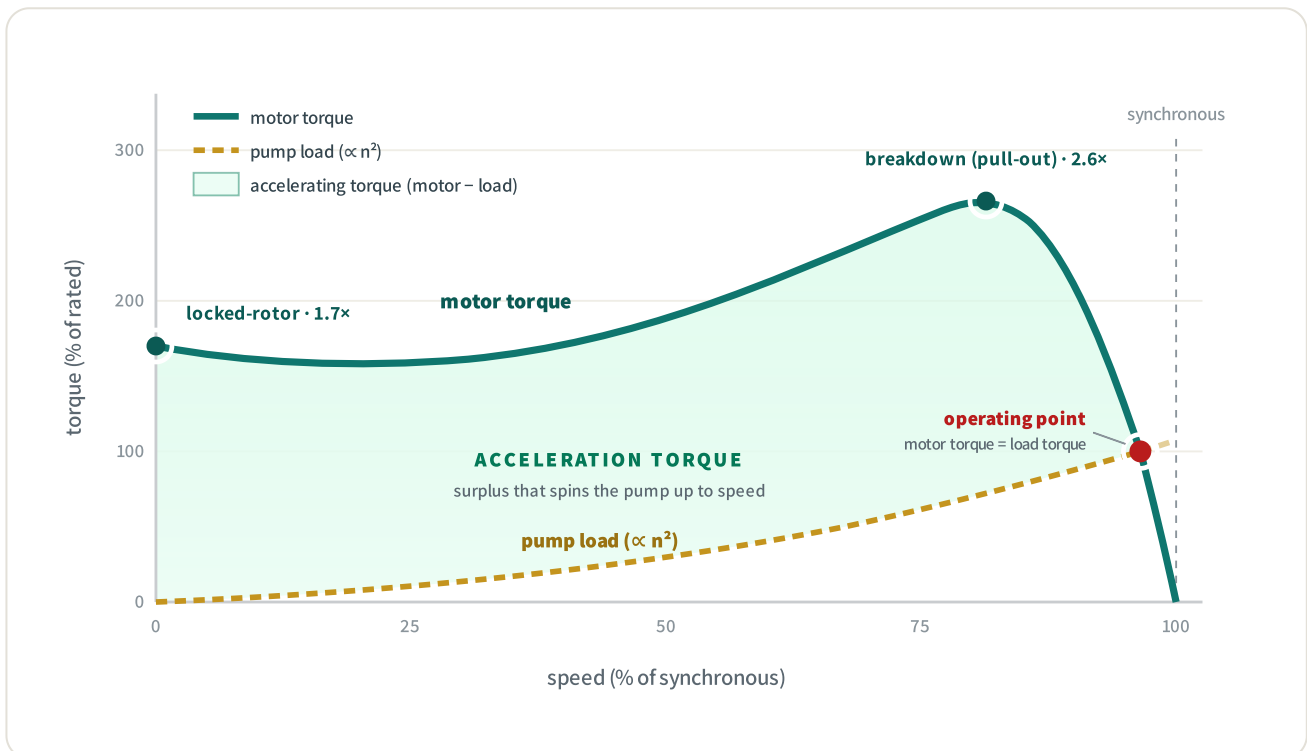
תוצאה: **1455 rpm** בפועל מול 1500 rpm סינכרוני. זו המהירות האמיתית של ציר המשאבה, וזה הערך שצריך להציב בחוקי הדמיות (פרק 14) ובחישוב המהירות הסגולית (פרק 5), לא ה-1500 הסינכרוני התאורטי.

שים לב לפח נפוץ. על לוחית המנוע כתוב לרוב 1450 או 1455 rpm, לא 1500. זו כבר המהירות בעומס. כשמנרמלים בדיקת שדה לתדר נומינלי (פרק 25), חובה לעבוד עם המהירות שנמדדה בפועל בזמן הבדיקה, לא עם המהירות שעל הלוחית ולא עם הסינכרונית.

עקום המומנט-מהירות: איך מנוע מתעורר

כשמדליקים מנוע השראה ישירות, הוא לא קופץ מיד למהירות העבודה. הוא מטפס לאורך **עקום המומנט-מהירות** (*torque-speed curve*) שלו, ולעקום הזה צורה אופיינית שחשוב להכיר, כי היא מסבירה גם את ההתנעה וגם את זרם הפתיחה הגבוה.

בהתנעה (מהירות אפס) המנוע מספק **מומנט נעילה** (*locked-rotor torque*), בדרך כלל 1.5 עד 2.5 פעמים מומנט העבודה. ככל שהוא מאיץ המומנט עולה עד שיא, ה **מומנט המרבי** (*breakdown / pull-out torque*), ואז צונח לעבר נקודת העבודה. נקודת העבודה היציבה היא המקום שבו מומנט המנוע משתווה למומנט הנדרש מהמשאבה, ממש מתחת למהירות הסינכרונית.



איור 19.1 · עקום המומנט-מהירות של מנוע השראה (טורקיז) מול מומנט העומס של המשאבה (זהב, מקווקו, גדל עם n^2). השטח הירוק ביניהם הוא עודף המומנט שמאיץ את הסט: מ-locked-rotor דרך שיא ה-breakdown ועד נקודת העבודה (אדום), שבה מומנט המנוע משתווה לעומס ממש מתחת למהירות הסינכרונית. העומס הנמוך של המשאבה בתחילת הטווח הוא הסיבה שהיא סובלת יפה התנעת כוכב-משולש.

סכמטי · מבוסס על מאפיין מנוע השראה תקני NEMA B / IEC

למה משאבה קלה להתנעה

מומנט העומס של משאבה צנטריפוגלית גדל עם **ריבוע** המהירות ($T \propto n^2$), בדיוק כמו ההספק שגדל עם החזקה השלישית (פרק 14). בהתנעה, כשהמהירות נמוכה, גם המומנט הנדרש נמוך מאוד. זו הסיבה שמשאבות סובלות יפה התנעת כוכב-משולש, שמחלישה את מומנט ההתנעה: בדיוק כשהמנוע חלש, גם העומס חלש. מסוע או מגרסה, לעומת זאת, דורשים מומנט מלא כבר מהרגע הראשון, ולכן אצלם כוכב-משולש בעייתי.

דרגות נצילות: IE1 עד IE5

ההבדל בין מנוע למנוע אינו רק במחיר. מנוע יכול לבזבז בין כ-4% לכ-9% מהחשמל שעובר דרכו, תלוי בהספק ובדרגת הנצילות שלו. התקן הבינלאומי IEC 60034-30-1 מסווג מנועים לחמש דרגות, מ-IE1 (בסיסי) עד IE5 (אולטרה-פרימיום). ככל שהמספר גבוה יותר, נצילות גבוהה יותר ואיבוד נמוך יותר.

מאז 2017 חלה בישראל ובאירופה חובת IE3 כמינימום למנועים חדשים בטווחי הספק רחבים, ובחלק מהטווחים כבר IE4. הנצילות עולה עם ההספק: מנוע 1.5 kW זול יותר לבזבז, מנוע 150 kW כבר עובד סביב 94%-97%, תלוי בדרגה. ההבדל באחוזים נראה קטן, אבל על פני אלפי שעות עבודה בשנה הוא מתורגם לאלפי שקלים לכל מנוע.

טבלה 19.2 • נצילות מנוע אופיינית לפי דרגת IE והספק (4 קטבים, IEC 60034-30-1 50 Hz)

IE5	IE4	IE3	IE2	IE1	(kW) הספק
90.4	88.2	85.6	82.5	78.5	1.5
93.4	92.0	90.4	88.7	87.0	7.5
95.4	94.5	93.6	92.3	91.0	30
96.2	95.6	95.0	94.0	93.0	75
96.8	96.3	95.8	94.8	94.0	150

ערכי נצילות באחוזים, בעומס מלא. הערכים האמיתיים משתנים מעט בין יצרנים. IE3 = חובה מינימלית, IE4 = Super-Premium.

דרגות IE1–IE4 הוגדרו במהדורת 2014 של IEC 60034-30-1; דרגת IE5 נוספה רשמית במהדורה השנייה של התקן (2025). ערכי IE5 בעמודה אינדיקטיביים (הפסדים נמוכים בכ-20% מ-IE4).

8%

איבוד אופייני במנוע IE1
קטן וישן

₪1,800

חיסכון שנתי משוער
IE1→IE3, 30 kW, 5,000 שעות

~2.5%

פער נצילות אופייני
IE1→IE3 במנוע 30 kW

IE3

המינימום החוקי לרוב
המנועים החדשים

פח גודל מנוע: אל תגזים

נצילות הלוחית של המנוע נמדדת בעומס מלא. מנוע גדול מדי שעובד ב-40% עומס נופל הרבה מתחת לדרגתו, ובמיוחד מקדם ההספק שלו צונח. מהנדס שמתקין מנוע 45 kW "ליתר ביטחון" על משאבה שצורכת 22 kW משלם פעמיים: גם על המנוע היקר וגם על נצילות ומקדם הספק ירודים לאורך כל חיי המתקן. **בחר מנוע שנקודת העבודה שלו נמצאת ב-75%-95% מהספקו הנקוב**, שם הנצילות בשיאה.

מקדם הספק והקנס מחברת החשמל

מנוע השראה צורך שני סוגי הספק. **ההספק הפעיל** ($active, kW$) הוא זה שעושה עבודה ומסובב את המשאבה. אבל המנוע צורך גם **הספק ראקטיבי** ($reactive, kVA$) כדי לבנות את השדה המגנטי, והספק זה לא עושה עבודה מועילה. היחס ביניהם הוא **מקדם ההספק** ($power factor, \cos \varphi$).

נוסחה 19.2 • מקדם הספק והספק חשמלי

$$\cos \varphi = P_{\text{active}} / S_{\text{apparent}} \quad | \quad P_1 = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \cos \varphi / 1000$$

$\cos \varphi$ מקדם ההספק, בין 0 ל-1. מנוע משאבה טיפוסי בעומס מלא: 0.82–0.88.
 P_{active} ההספק הפעיל [kW], זה שמשלמים עליו במונה ועושה עבודה.
 S_{apparent} ההספק המדומה [kVA], מה שהרשת באמת מספקת (פעיל + ראקטיבי).
 P_1 ההספק החשמלי הנכנס [kW], אותו קבוע $\sqrt{3}$ מפרק 4 ומבדיקת הנצילות (פרק 25).

הסף הישראלי והקנס

חברת החשמל דורשת מקדם הספק מינימלי, וכשהוא יורד מתחתיו מוטל **קנס בחשבון**, תוספת אחוזית על החיוב. הספים המקובלים בישראל: 0.92 במתח נמוך, 0.90 במתח גבוה. מנוע גדול מדי בעומס חלקי הוא הסיבה השכיחה ביותר לקנס. שני פתרונות: **סוללת קבלים** (capacitor bank) שמספקת את ההספק הראקטיבי מקומית ומתקנת את מקדם ההספק, או **ממיר תדר** שבדרך כלל גם משפר את מקדם ההספק בכניסה. שים לב, ממיר תדר אינו תחליף לסוללת קבלים לתיקון מקדם הספק של עומסים אחרים בלוח, רק של המנוע שהוא מניע.

מקדם שירות ומנוע inverter-duty

שני מושגים מעשיים שמופיעים על לוחית המנוע ובכתב הכמויות, וכדאי לדעת לקרוא אותם.

מקדם שירות (service factor, SF)

מספר קטן על הלוחית, בדרך כלל 1.0 או 1.15, שאומר כמה אפשר להעמיס את המנוע מעבר להספקו הנקוב לזמן קצר בלי לשרוף אותו. מנוע 30 kW עם $SF = 1.15$ סובל 34.5 kW לפרקי זמן. זו רזרבה לבטיחות, לא הזמנה לעבוד שם דרך קבע, כי עבודה רציפה מעל ההספק הנקוב מקצרת את חיי הבידוד והמסבים.

מנוע inverter-duty

כשמתכננים להניע מנוע בממיר תדר, לא כל מנוע מתאים. הממיר מייצר את המתח שלו בפולסים מהירים (**אפנון רחב פולס** (PWM)), והפולסים האלה יוצרים מתחי פסגה ושיפועי מתח תלולים (dV/dt) שמכרסמים בבידוד המנוע ויכולים לשרוף אותו. מנוע **inverter-duty** (*inverter-rated*) בנוי לכך: בידוד מחוזק לפי NEMA MG-1 Part 31 ולעיתים מסב מבודד או מברשת הארקה נגד **זרמי מסבים** (*bearing currents*).

כבל ארוך לקידוח עמוק

בקידוח עמוק המרחק בין הממיר (על פני הקרקע) למנוע (במעמקים) יכול להגיע לעשרות ומאות מטרים. ככל שהכבל ארוך יותר, מתחי הפסגה על הדקי המנוע גבוהים יותר עקב החזרות גל. בלי מסנן dv/dt או מסנן סינוס בין הממיר למנוע, אפילו מנוע inverter-duty עלול להישרף. בקידוח עמוק עם ממיר, מסנן יציאה הוא חובה, לא אופציה. אל תחבר ממיר למנוע ישן שלא תוכנן לכך.

ממיר או מתנע: ארבע שיטות התנעה ובקרה

למנוע השראה יש זרם התנעה (*inrush current*) גבוה מאוד, פי 6 עד 8 מזרם העבודה הרגיל, כי ברגע הפתיחה הרוטור נייח וההחלקה שווה ל-100%. הזרם העצום הזה מפיל מתח ברשת, מחמם, ומפעיל פטיש מים בצנרת. ארבע שיטות מטפלות בו, ושתיים מהן גם נותנות בקרת מהירות. ההבדל המהותי, שצריך לחרוט: **מתנע רק מתניע, ממיר גם שולט במהירות לאורך כל העבודה.**

DOL • התנעה ישירה (direct-on-line)

מחברים את המנוע ישירות לרשת. פשוט, זול, אמין, וזרם ההתנעה מלא, פי 6 עד 8. מתאים למנועים קטנים (עד כ-7.5 kW) ששטף הזרם שלהם לא מטריד את הרשת.

כוכב-משולש (star-delta)

מתניעים בחיבור כוכב, שמחלק את המתח על כל ליפוף בשורש 3, ואז עוברים למשולש. זרם ההתנעה יורד לכשליש ($\times 3-2$), אבל גם מומנט ההתנעה יורד לכשליש. מצוין למשאבות, שעומסן קל בהתנעה (איור 19.1), בעייתי לעומסים כבדים. רגע המעבר כוכב-משולש מייצר נתק קצר וזרם מעבר.

מתנע רך (soft-starter)

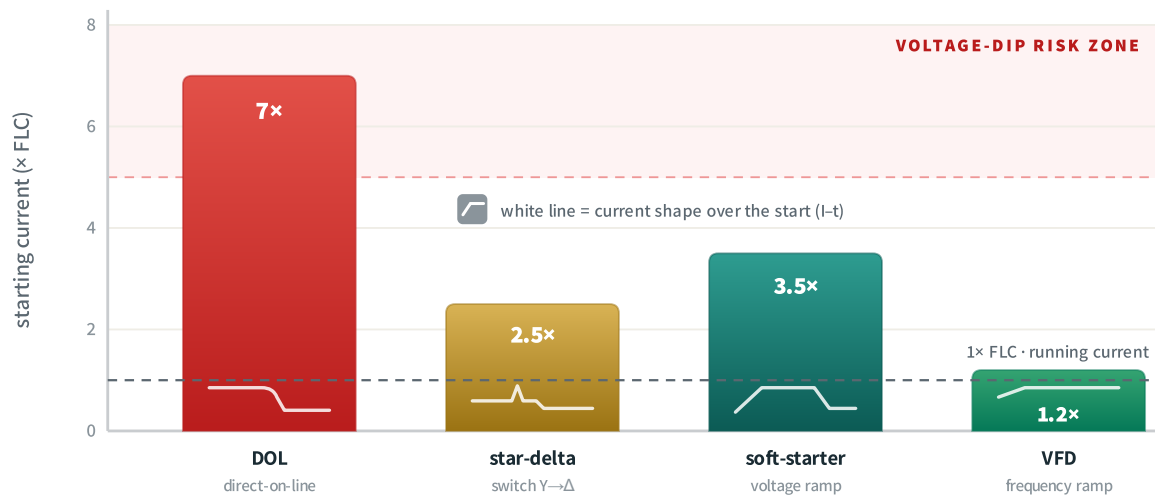
אלקטרוניקת הספק מעלה את המתח בהדרגה לאורך רמפה, כך שהמנוע מאיץ חלק והזרם נשאר מרוסן. מבטל פטיש מים בהתנעה ובעצירה. אבל הוא שולט רק בהתנעה, ברגע שהמנוע במהירות מלאה הוא מנותק והמנוע רץ ישיר על הרשת. **מתנע רך לא חוסך אנרגיה בעבודה.**

ממיר תדר (VFD)

משנה את תדר ההזנה ולכן את המהירות (נוסחה 19.1). מתניע רך, מרסן זרם, וחשוב מכל, מאפשר להריץ את המשאבה בכל מהירות ולחסוך אנרגיה לפי חוק החזקה השלישית (פרק 14). המחיר: יקר יותר, מייצר הרמוניות, ודורש מנוע inverter-duty. זה הנושא של פרק 21 כולו.

טבלה 19.3 • השוואת שיטות התנעה ובקרה

שיטה	זרם התנעה	מומנט התנעה	עלות יחסית	בקרת מהירות	מתי לבחור
DOL • התנעה ישירה	אגבה מאוד • 6-8	מלא	זול מאוד	אין	מנועים קטנים ($\geq 7.5 \text{ kW}$)
כוכב-משולש	אבינוני • 2-3	$\sim \frac{1}{3}$	זול	אין	בינוניים, עומס קל בהתנעה (משאבה)
מתנע רך • soft-starter	בינוני • 3-4x (מתכוונן)	מבוקר	בינונית	רק בהתנעה	ריסון זרם ופטיש מים, ביקוש קבוע
ממיר תדר • VFD	נמוך מאוד	מלא ומבוקר	גבוהה	מלאה ורציפה	ביקוש משתנה, חיסכון אנרגיה, בקרה



איור 19.2 • זרם ההתנעה ביחס לזרם העבודה (FLC) בארבע שיטות. הקו הלבן בתוך כל עמודה משרטט את צורת הזרם לאורך ההתנעה: DOL מחזיק פי 7 עד שהמנוע מאיץ, כוכב-משולש יורד לכשליש עם קפיצת זרם ברגע המעבר, מתנע רך מטפס ברמפה מבוקרת, וממיר התדר מאיץ בהדרגה כמעט ללא שטף. הרצועה הוורודה מסמנת את התחום שמפיל מתח ברשת.

ערכים טיפוסיים להמחשה • $FLC = \text{Full Load Current}$

ההכרעה בשורה אחת

השאלה היחידה שמכריעה היא: **הביקוש קבוע או משתנה?** אם הביקוש קבוע והבעיה היחידה היא זרם או פטיש מים בהתנעה, **מתנע רך** מספיק וזול בהרבה. אם הביקוש **משתנה**, או שרוצים לחסוך חשמל בהורדת מהירות, **ממיר תדר** הוא הבחירה, כי רק הוא מנצל את חוק החזקה השלישית. מתנע רך לא חוסך אגורה בעבודה, הוא רק מרכז התנעה. זה ההבדל היחיד שצריך להבין כדי לא לבזבז כסף לשני הכיוונים.

1 DOL למנוע קטן

1

עד כ-7.5 kW, כשהרשת חזקה ושטף הזרם לא מטריד. הזול והאמין ביותר, בלי אלקטרוניקה שמתקלקלת.

2 כוכב-משולש למשאבה בינונית בביקוש קבוע

2

פתרון קלאסי וזול להורדת זרם ההתנעה, כשהמשאבה רצה תמיד באותה נקודה ואין צורך בבקרת מהירות.

3 מתנע רך כשפטיש המים הוא הבעיה

3

כשהדאגה היא גלי לחץ והלם בצנרת בהתנעה ובעצירה, אבל הביקוש קבוע ואין הצדקה כלכלית לממיר.

4 ממיר תדר לביקוש משתנה ולחיסכון

4

כשהספיקה הנדרשת משתנה לאורך היום, או כשרוצים לרדת במהירות ולחסוך לפי חוק החזקה השלישית. גם מתניע רך, גם משפר מקדם הספק, גם שולט. המחיר: יקר והרמוניות.

אז מה? המנוע הוא חצי מהמשוואה, וההנעה קובעת את החיסכון. מנוע ההשראה פשוט ואמין, אבל דרגת ה-IE שלו קובעת בזבז קבוע, מקדם ההספק קובע אם תקבל קנס, וגודלו קובע אם הוא עובד בשיא או נגרר בעומס חלקי. שיטת ההתנעה נשענת על שאלה אחת בלבד: קבוע או משתנה. מתנע רך לריסון התנעה, ממיר תדר לבקרה ולחיסכון. בפרק הבא נכמת בדיוק כמה ממיר תדר חוסך, נשווה אותו לשניקה ולחיתוך מאיץ, ונראה מתי הוא לא משתלם.

קישורים בספר

שרשרת הנצילות, שבה נצילות המנוע מוכפלת בנצילות המשאבה וה-VFD, בפרק 4. השפעת שינוי המהירות על הספיקה, העומד וההספק (חוקי הדמיות) בפרק 14. ויסות ספיקה והשוואת VFD מול שניקה מול חיתוך מאיץ בפרק 21. בדיקת נצילות בשטח, שבה מודדים U , I , $\cos \varphi$ ומחשבים P_1 ו- η , בפרק 25. הכלכלה של החלפת מנוע ושדרוג דרגת IE, ושיקולי NPV ותקופת החזר, בפרק 27.

20 המנוע לעומק: בנייה, בידוד והישרדות מול הממיר

The Motor in Depth: Build, Insulation & Surviving the Drive

בקצרה

בפרק הקודם הכרנו את מנוע ההשראה מבחון: מהירות סינכרונית, החלקה, דרגות נצילות IE, מקדם הספק והשאלה "ממיר או מתנע". כאן אנחנו פותחים את המנוע. למה מנוע אחד רץ עשרים שנה מתחת לאדמה בלי שנגעו בו, ומנוע זהה לו נשרף תוך שמונה-עשר חודשים? התשובה כמעט אף פעם אינה המנוע עצמו, אלא **איך מתייחסים אליו**.

שלושה רוצחים שקטים אורבים למנוע, ובמיוחד למנוע שמוזן **מממיר תדר**: חום שמזקין את הבידוד, מתחי פסגה שמכרסמים בליפופים, וזרמי מיסבים שאוכלים את המסבים מבפנים. נוסף לכך פרט בנייה אחד שמכריע בכל באר בישראל, מנוע **הציר החלול**, ונקבל את הפרק שהופך את המנוע מ"קופסה שחורה שמסובבת" לרכיב שמבינים, בוחרים ומגינים עליו נכון.

מאיפה באים ההפסדים: מה באמת קונים בדרגת IE

דרגת ה-IE שראינו בפרק 19 היא רק מספר על הלוחית. מאחוריו עומדים חמישה הפסדים פיזיים, וכל קפיצת דרגה מקצצת בהם. מי שמבין מאיפה הם באים, מבין גם למה מנוע גדול נצילותו גבוהה יותר, ולמה עומס חלקי הורס אותה.

החשמל שנכנס למנוע אינו יוצא כולו כעבודה מכנית בציר. ההפרש, **ההפסדים** (*losses*), הופך לחום שצריך לפנות. במנוע השראה טיפוסי ההפסדים מתחלקים לחמישה מקורות, ולכל אחד אופי משלו:

הפסדי נחושת בסטטור · $stator I^2R (copper)$

חימום אוהמי בליפופי הסטטור, פרופורציוני לריבוע הזרם. ההפסד הגדול ביותר, וגדל מהר בעומס יתר ובעומס חלקי עם מקדם הספק ירוד.

הפסדי נחושת ברוטור · $rotor I^2R$

חימום בכלוב הרוטור מהזרמים המושרים. קשור ישירות להחלקה: ככל שההחלקה גדולה, ההפסד גדול. זו הסיבה שמנוע "חזק בהחלקה" חם יותר.

הפסדי ברזל / ליבה · $core / iron$

היסטרזיס וזרמי מערבולת בפחי הסטטור. תלויים בתדר ובשטף המגנטי, וכמעט קבועים כל עוד המנוע מחובר למתח, גם בלי עומס.

חיכוך ואוויר · $friction \& windage$

חיכוך במסבים והתנגדות אוויר של מאוורר הקירור. קבועים בקירוב, ותלויים במהירות. במנוע מהיר (2 קטבים) ההפסד הזה גדל.

הפסדים תועים · $stray load$

הפסדים מפוזרים בעומס משטפי פיזור והרמוניות. קשים לכימות, וגדלים מאוד כשמזינים את המנוע מממיר תדר, כפי שנראה בהמשך.

WHERE THE 100% GOES · medium induction motor (≈ 30 kW, IE3)

electrical input

100% electrical power in

split

$\approx 93.6\%$ useful shaft power

6.4%

losses

the 6.4% of losses, exploded (share of total loss)



stator copper I^2R

rotor I^2R

core / iron

friction & windage

stray-load (rises sharply on a VFD)

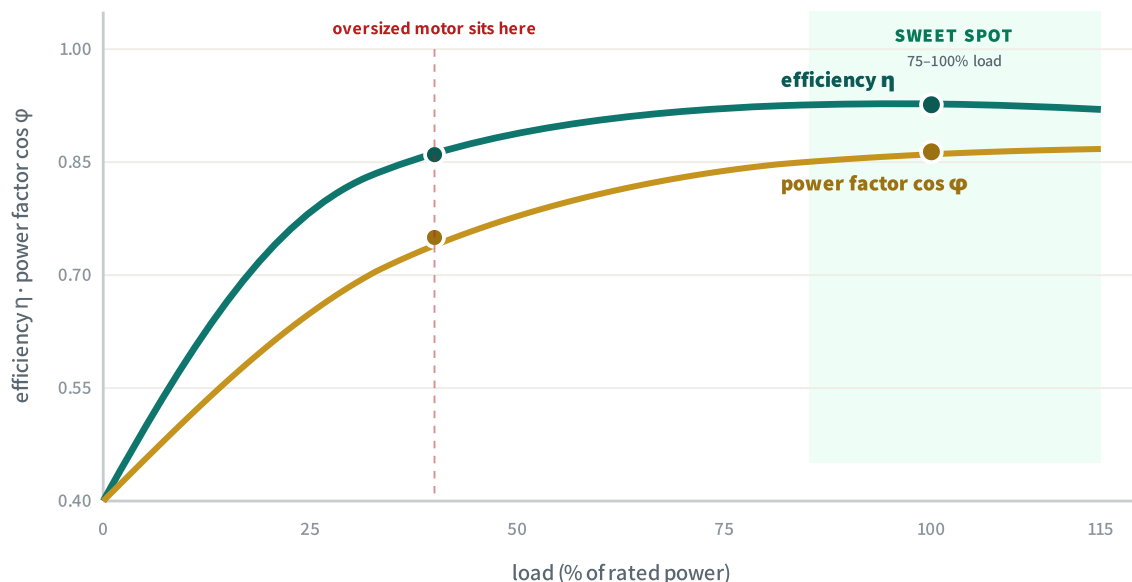
איור 20.1 · לאן הולך ה-100%. במנוע השראה בינוני (IE3, 30 kW) רק כ-6.4% מההספק החשמלי הופך לחום, אבל בפירוק של ההפסד הזה רואים את הקרב האמיתי: הפסדי הנחושת בסטטור הם הנתח הגדול, ולכן שדרוג דרגת IE מוסיף בעיקר נחושת ומקצר את מסלולי הזרם. ההפסד התועה (אפור) הוא קטן ברשת, אבל הוא שמזנק כשמזינים את המנוע מממיר תדר.

חלוקה אופיינית · הערכים משתנים בין יצרנים וגדלים

למה מנוע גדול תמיד יעיל יותר

הפסדי הברזל, החיכוך והאוויר הם בקירוב **קבועים**, לא תלויים בעומס. במנוע גדול הם מתחלקים על פני הספק עבודה גדול, ולכן משקלם היחסי קטן והנצילות גבוהה. מנוע 1.5 kW נושא את אותם "מסים קבועים" על הספק זעיר, ולכן נצילותו נמוכה מהותית ממנוע 150 kW (השוו לטבלה 19.2). זו אותה סיבה בדיוק שבגללה **עומס חלקי הורס נצילות**: כשהמנוע נותן רק 40% מהספקו, ההפסדים הקבועים נשארים, אבל מתחלקים על פחות עבודה.

את האפקט הזה הכי קל לראות בעקום הנצילות מול העומס. הנצילות שטוחה וגבוהה בטווח 75%–100% מההספק הנקוב, ואז צונחת. מקדם ההספק צונח עוד יותר תלול, וזו הסיבה שמנוע גדול מדי בעומס חלקי גם מבזבז וגם חוטף קנס מקדם הספק (פרק 19).



איור 20.2 · נצילות (טורקיז) ומקדם הספק (זהב) מול אחוז העומס. שניהם גבוהים ושטוחים ב-75%–100% מההספק הנקוב, וצונחים בעומס חלקי. מנוע גדול מדי שיושב סביב 40% עומס (הקו האדום) משלם בשני המישורים: נצילות נמוכה **וגם** מקדם הספק ירוד שמזמין קנס. זו ההמחשה הכמותית לאזהרת "אל תגזים בגודל" מפרק 19.

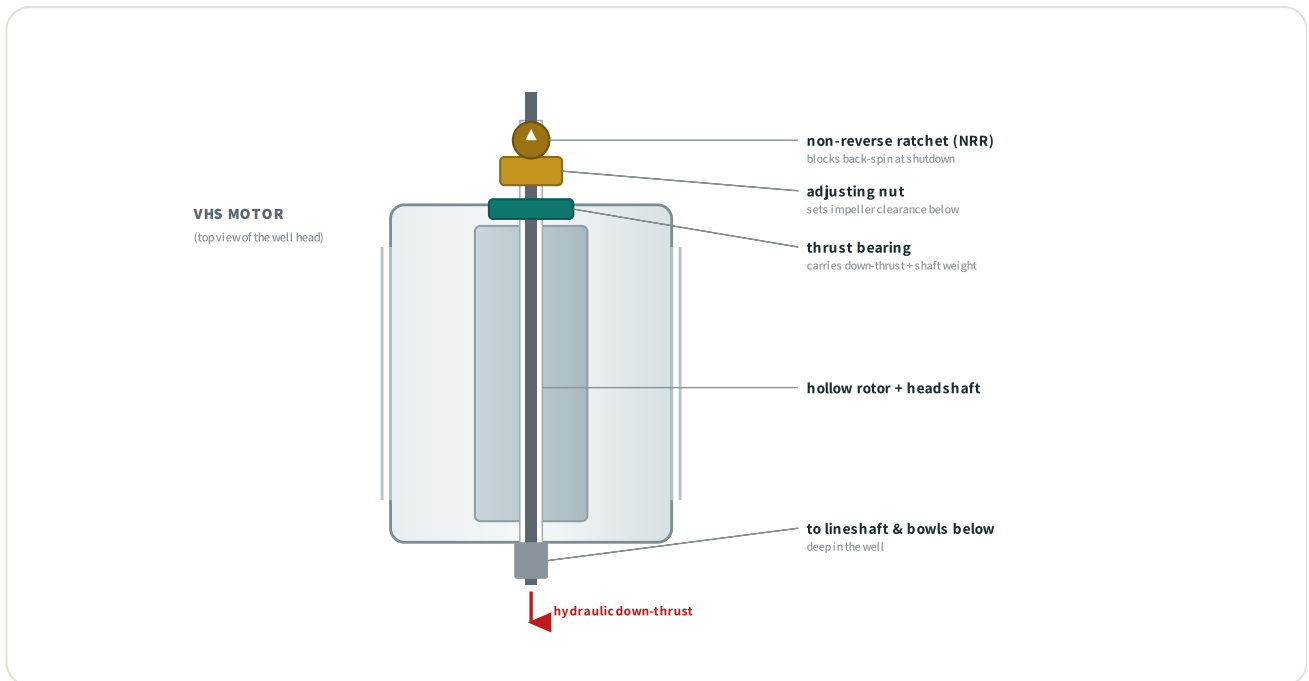
צורת עקום אופיינית למנוע השראה 4 קטבים

מנוע הציר החלול: הלב של משאבת הבור האנכית

עד כה דיברנו על מנוע אופקי עם ציר מלא, שמחובר למשאבה במצמד (פרק 6). אבל כל באר מים, וכל משאבת טורבינה אנכית עם ציר העברה (**vertical turbine, lineshaft**, פרק 12), מונעת על ידי טיפוס מנוע אחר לגמרי: **מנוע ציר חלול אנכי** (*vertical hollow-shaft, VHS*). ההבדל אינו טכני-זוטא, הוא קובע את ההתקנה, את האחזקה ואת הבטיחות של רוב מתקני המים בישראל.

במנוע ציר חלול, כשמו, **הרוטור חלול לכל אורכו**. ציר ההעברה של המשאבה (**ציר ראש** (*headshaft*)) עולה מהמשאבה שבעומק, חודר דרך חור הרוטור, ובוקע בראש המנוע.

שם הוא ננעל באום כיוון (adjusting nut). הברגה או שחרור של האום הזה מרימה או מורידה את כל טור הצירים והמאיצים שמתחת, ובכך קובעת את מרווח הריצה של המאיצים בתוך התאים, עשרות מטרים מתחת לרגלי המתקין. כל מתקין באר מכיר את רגע "כיוון המשאבה" הזה: מסובבים אום אחד בראש, ומווסתים מרווחים בעומק.



איור 20.3 · מנוע ציר חלול אנכי (VHS). ציר הראש עולה מהמשאבה שבעומק דרך הרוטור החלול, וננעל באום הכיוון בראש, שם מכוונים את מרווח המאיצים. מסב הדחף שבראש המנוע נושא את כל הדחף ההידראולי כלפי מטה ואת משקל טור הצירים. מנגנון אל-חזור (NRR) חוסם סיבוב לאחור ברגע הכיבוי, כשעמוד המים מנסה ליפול חזרה דרך המאיצים.

סכמטי · מבנה אופייני של מנוע VHS לבאר מים

שני רכיבים במנוע הזה אחראים על רוב התקלות, וכדאי להבין אותם לעומק:

מסב הדחף שבראש המנוע

במשאבת בור, כל הדחף ההידראולי כלפי מטה של כל השלבים, בתוספת משקל טור הצירים והמאיצים, מועבר כלפי מעלה אל **מסב הדחף שבראש המנוע**, לא אל המשאבה. זהו רכיב כבד, לרוב זוג מסבי מגע זוויתי, מסב גלילי כדורי, או מסב לחץ הידרודינמי בלוחות במנועים גדולים מאוד. בחירת מנוע VHS מתחילה תמיד בשאלה **כמה דחף הוא צריך לשאת** (thrust rating, ביחידות כוח), ולא רק כמה kW. מנוע עם דירוג דחף נמוך מדי ייכשל במסב הדחף גם אם הספקו מספיק. זה אחד ההבדלים הגדולים מול מנוע אופקי, שבו הדחף נישא במסב המשאבה (פרק 8).

מנגנון אל-חזור (non-reverse ratchet, NRR)

כשמכבים משאבת בור, עמוד המים הגבוה שבצינור הסניקה מנסה ליפול בחזרה דרך המאיצים ולסובב את כל הטור **לאחור**. בבאר עמוקה הסיבוב לאחור יכול להגיע למהירויות מסוכנות, להתיר ברגות צירים ולשבור את המשאבה. מנגנון אל-חזור בראש המנוע מאפשר סיבוב בכיוון אחד בלבד וחוסם את הסיבוב לאחור. **שסתום אל-חזור בקו הסניקה אינו תחליף**, הוא מגן על הצנרת, אבל אם הוא דולף, ה-NRR הוא קו ההגנה האחרון של ציר המשאבה.

מתי הציר החלול הוא מלכודת

מנוע VHS נבחר לפי דחף, מהירות וכיוון. שלוש טעויות שטח חוזרות: (1) **דירוג דחף נמוך מדי**, שהורג את מסב הדחף תוך חודשים; (2) **שכחת ה-NRR** בבאר עמוקה, שמובילה לסיבוב לאחור ולשבר ציר ברגע הכיבוי; (3) **כיוון אום שגוי**, שמשפשף את המאיצים בתאים או מרחיק אותם ומאבד עומד. בעבודה עם ממיר תדר נוסף סיכון רביעי: כיבוי-הדלקה תכופים מגבירים את עומסי הדחף המעבר על המסב, ולכן בבאר על ממיר מגדירים רמפות עצירה מבוקרות.

דרגות בידוד: כמה חום המנוע סופג לפני שהוא מת

הליפופים במנוע עטופים בבידוד אורגני, וחום הוא האויב מספר אחת שלו. דרגת הבידוד אינה מספר שיווקי, היא חוזה בין היצרן לחום: עד כמה הליפוף יכול להתחמם לפני שהבידוד מתפורר וקצר חשמלי שורף את המנוע.

התקן IEC 60034-1 (יחד עם IEC 60085) מסווג חומרי בידוד ל **דרגות תרמיות** (*thermal classes*) לפי הטמפרטורה המרבית של הנקודה החמה בליפוף. הדרגות הנפוצות במנועי משאבות הן B, F, H:

טבלה 20.1 • דרגות בידוד תרמיות (כלי עזר • IEC 60034-1 / 60085)

דרגה	טמפ' מרבית בנקודה החמה	עליית טמפ' מותרת (שיטת ההתנגדות)	נפוצות
A	105 °C	60 K	ישן, כמעט לא בשימוש
E	120 °C	75 K	נדיר
B	130 °C	80 K	סטנדרט ותיק
F	155 °C	105 K	הסטנדרט כיום
H	180 °C	125 K	תובעני, ממיר, חם

עליית הטמפ' המותרת נמדדת בשיטת ההתנגדות, בטמפ' סביבה ייחוס 40 °C ועד גובה 1000 m. התקציב: 40 °C סביבה + עליית טמפ' + שמורת נקודה חמה = הטמפ' המרבית של הדרגה.

נוסחה 20.1 • תקציב הטמפרטורה של המנוע

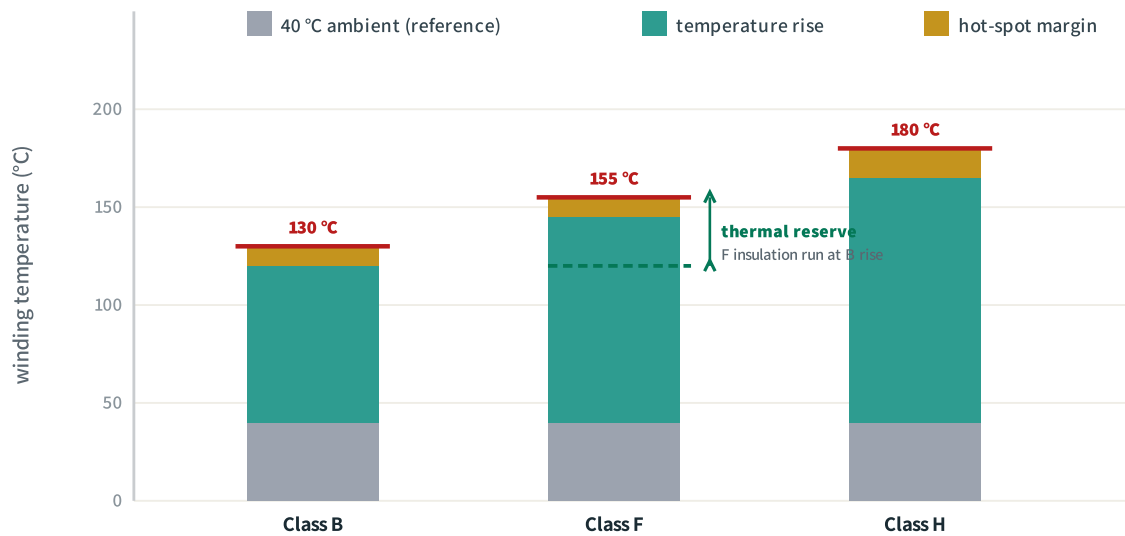
$$T_{\text{hotspot}} = T_{\text{ambient}} + \Delta T_{\text{rise}} + \Delta T_{\text{margin}} \leq T_{\text{class}}$$

T_{ambient} טמפרטורת הסביבה. ייחוס התקן 40 °C; בלוח חשמל סגור בקיץ ישראלי היא יכולה להיות גבוהה הרבה יותר.

ΔT_{rise} עליית הטמפ' של הליפוף בעומס, נמדדת בשיטת ההתנגדות (טבלה 20.1).

ΔT_{margin} שמורת הנקודה החמה: H → 15 K, F → 10 K, B → 10 K.

T_{class} תקרת הדרגה (טבלה 20.1). חציית התקרה דרך קבע = הזדקנות מואצת של הבידוד.



איור 20.4 · תקציב הטמפרטורה לפי דרגה. כל עמודה נבנית מאותם 40 °C סביבה (אפור), פלוס עליית הטמפ' המותרת (טורקיז), פלוס שמורת הנקודה החמה (זהב), עד תקרת הדרגה (אדום). הקו הירוק המקווקו מראה את הפרקטיקה החשובה ביותר: בידוד F המופעל ברק B משאיר שמורה תרמית גדולה, וזו בדיוק הרזרבה שצריך כשמזינים מנוע מממיר תדר.

לפי מגבלות IEC 60034-1, סביבה 40 °C, עד 1000 m

כלל 10 המעלות: למה חום הורג בשקט

החוק שכל מי שבוחר מנוע חייב להכיר (כלל Montsinger, חוק Arrhenius ליישום): **כל 10 °C מעל הטמפרטורה התכנונית מקצרים את חיי הבידוד בחצי**. מנוע שתוכנן ל-20 שנה ב-130 °C, אם ירוץ דרך קבע ב-150 °C, יחזיק כ-5 שנים בלבד. החום אינו שורף את המנוע מיד, הוא **מזקין** את הבידוד בהדרגה עד שיום אחד נוצר קצר. זו הסיבה שלוח חשמל חם, אוורור חסום, או מנוע עמוס מדי הם פצצת זמן שקטה, גם אם המנוע "עובד מצוין" כרגע.

הפרקטיקה: בידוד F, עליית B

הסטנדרט המקצועי כיום הוא להזמין מנוע עם **בידוד דרגה F אך לתכנן אותו לעליית טמפ' של דרגה B** ("F insulation, B rise"). זה משאיר כ-25 °C שמורה תרמית, שמתורגמת ישירות לאורך חיים כפול לפי כלל 10 המעלות. במנוע על **ממיר תדר**, או בסביבה חמה, השמורה הזו אינה מותרת, היא קו ההגנה: ההפסדים ההרמוניים (הסעיף הבא) "אוכלים" חלק ממנה. כשהמנוע קריטי או חם במיוחד, עולים לבידוד H.

איך ממיר התדר מחמם את המנוע

ממיר תדר חוסך אנרגיה במערכת (פרק 19, ופרק הוויסות שאחריו), אבל מנקודת מבט המנוע **הוא מקור חום נוסף**. אותו מנוע בדיוק יתחמם יותר על ממיר מאשר ישירות מהרשת, משלוש סיבות שמצטברות:

1 הפסדים הרמוניים

הממיר אינו מספק סינוס נקי אלא פולסים (PWM). הזרם נושא הרמוניות בתדר גבוה שמוסיפות הפסדי נחושת והפסדי ברזל, ומנפחות במיוחד את ההפסד התועה (איור 20.1). תוספת ההפסדים האופיינית היא 10%–20% מעל הזנה סינוסואידלית.

2 קירור עצמי נחלש במהירות נמוכה

במנוע מקורר-מאוורר (TEFC) המאוורר יושב על הציר. כשהממיר מאט את המנוע, המאוורר מזיז פחות אוויר, והקירור נחלש בדיוק כשאולי עוד צריך אותו.

3 פעימות מומנט זרם

אדוות במומנט ובזרם מהמיתוג מוסיפות חימום מקומי קטן ורעידות. שוליות יחסית לשתי הראשונות, אבל קיימות.

הניואנס שמציל משאבות: עומס משתנה מול עומס קבוע

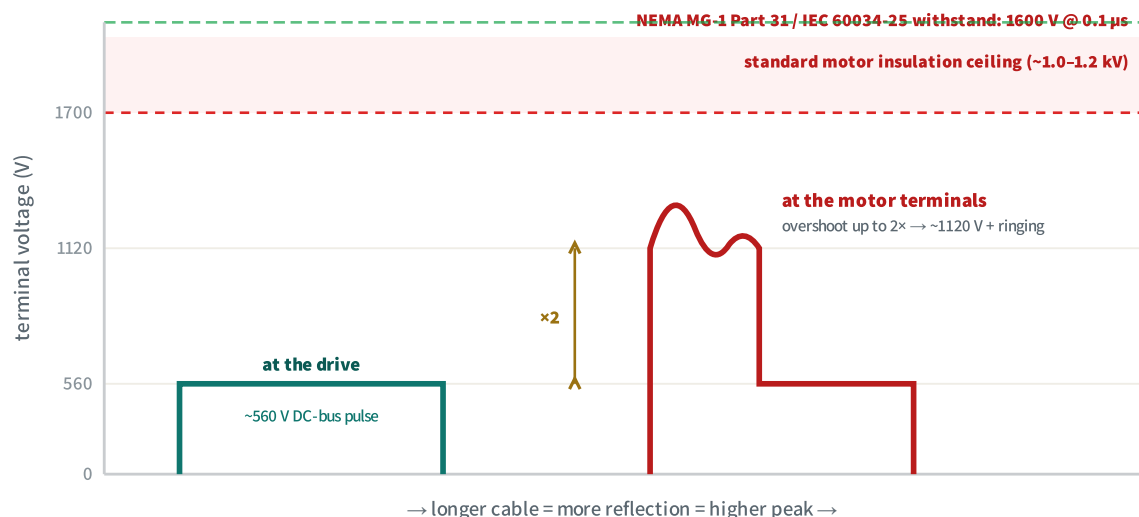
כאן ההבדל בין מהנדס שמבין משאבות למי שמעתיק כללים ממנוע מסוע. מומנט העומס של משאבה צנטריפוגלית גדל עם **ריבוע** המהירות ($T \propto n^2$), עומס "variable torque". לכן כשהממיר מאט את המשאבה, העומס, וההפסדים שתלויים בו, צונחים **מהר יותר** מהיחלשות הקירור. התוצאה: על עומס משאבה, מנוע TEFC רגיל מסתדר לרוב יפה לאורך כל טווח המהירויות הרלוונטי לוויסות. הבעיה החמורה של "קירור נחלש" שייכת לעומסי **מומנט קבוע** (מסועים, מדחסים, מעליות), ששם נדרש לעיתים מאוורר חיצוני נפרד (forced ventilation). אל תגררו את הכלל הזה למשאבה ותשלמו על מאוורר מיותר, אבל גם אל תתעלמו ממנו כשהמשאבה צריכה להחזיק מומנט גבוה במהירות נמוכה (למשל הזנק נגד עומד סטטי גבוה).

המסקנה המעשית פשוטה: מנוע על ממיר צריך **שמורה תרמית**. בידוד דרגה F בעליית B (הסעיף הקודם) הוא מינימום סביר; במנוע קריטי או חם שוקלים H, או מנוע מדורג מעט גדול יותר כדי לרוץ צנוע יותר. אבל החום הוא רק חצי מהסיפור של הממיר. החצי השני הוא חשמלי: מתחי הפסגה.

מתחי פסגה והחזרות גל: למה מנוע נשרף בקצה הכבל

הפולסים המהירים של הממיר אינם רק מחממים, הם גם מכים. שיפוע מתח תלול (dV/dt) ותופעת החזרת גל בכבל יכולים להכפיל את המתח על הדקי המנוע ולחורר את בידוד הליפופים, גם במנוע שנראה תקין לגמרי.

הממיר בונה את מתח היציאה מפולסים בעלי **חזית עלייה מהירה מאוד**, מאות וולטים בפחות ממיקרו-שנייה. כשפולס כזה נוסע בכבל ומגיע אל המנוע, שהעכבה שלו גבוהה מעכבת הכבל, חלק מהפולס **מוחזר בחזרה** אל הממיר. הפולס המוחזר מצטבר על הפולס הנכנס, ובאורך כבל מסוים המתח על הדקי המנוע יכול להגיע עד **פי שניים ממתח ה-DC** של הממיר. במערכת 400 V, מתח ה-DC הוא כ-560 V, וההכפלה מקפיצה את הפסגה על ההדקים אל מעבר ל-1100 V.



איור 20.5 · החזרת גל. הפולס יוצא נקי מהממיר (טורקיז, כ-560 V), אבל בקצה הכבל הפולס המוחזר מצטבר עליו ויוצר נחשול שיכול להכפיל את המתח (אדום), עם "צלצול" מעליו. ככל שהכבל ארוך יותר, הפסגה גבוהה יותר. תקרת הבידוד של מנוע רגיל (קו אדום מקווקו) עלולה להיחצות; מנוע מתאים-ממיר עומד בדרישת IEC 60034-25 / NEMA MG-1 Part 31 (קו ירוק).

להמחשת המנגנון · ערכים אופייניים למערכת V 400

שני דברים קובעים את חומרת התופעה: **אורך הכבל** בין הממיר למנוע, ו**זמן העלייה** של הפולס. ככל שהכבל ארוך יותר והפולס תלול יותר, הפסגה גבוהה יותר. לכן הבעיה חריפה במיוחד בקידוח עמוק, שבו הכבל בין הממיר על פני הקרקע למנוע במעמקים מגיע לעשרות ומאות מטרים (כפי שהוזכר בפרק 19).

טבלה 20.2 · הגנה על בידוד המנוע לפי אורך כבל (כלי עזר · ערכים אופייניים)

אמצעי	מה הוא עושה	אורך כבל בשטח בקירוב
מנוע מתאים-ממיר בלבד	בידוד מחוזק לפי NEMA MG-1 Part 31	קצר-בינוני
סליל יציאה / כבל מנוע (output reactor)	מאיט את חזית הפולס, מרכז dV/dt	~ 60 m
מסנן dV/dt	מגביל את שיפוע המתח ואת הפסגה	~ 150 m
מסנן סינוס (sine filter)	משחזר מתח סינוסואידלי כמעט מלא למנוע	ומעלה ~ 600 m

הספים תלויים בתדר המיתוג, בסוג הכבל וביצרן. בקידוח עמוק עם ממיר, מסנן יציאה הוא חובה ולא אופציה. מסנן סינוס גם מקטין משמעותית את זרמי המיסבים (הסעיף הבא).

חיבור לתקן ולמפרט

מנוע "מתאים להזנת ממיר" (inverter-duty, פרק 19) הוא מנוע שבידודו עומד בדרישת NEMA MG-1 Part 31: לעמוד בפסגה של 1600 V בזמן עלייה של $0.1 \mu s$ (למערכות עד 600 V). התקן המקביל הוא IEC 60034-25 (תכן מנוע להזנת ממיר) ו-IEC TS 60034-17 (מדריך יישום). מנוע ישן עם בידוד דרגה B ובלי חיזוק לא תוכנן לפולסים האלה. **אל תחברו ממיר למנוע ישן בלי לבדוק את הבידוד ובלי מסנן מתאים.**

זרמי מיסבים: הרוצח השקט של מנוע ה-VFD

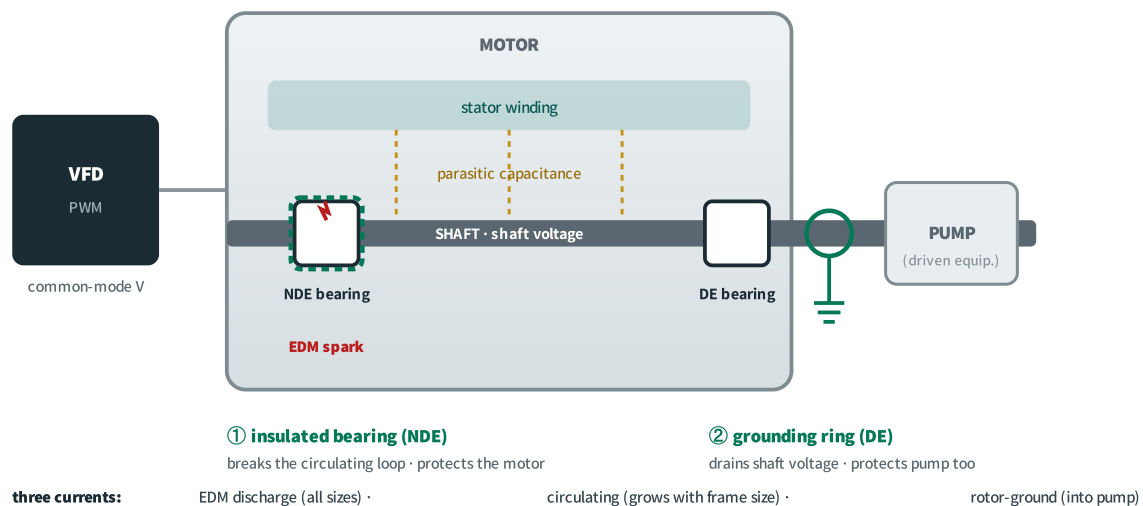
זו תופעת הלוואי המתעתעת ביותר של הממיר. מיסב של מנוע צעיר שמתחיל לרעוש אחרי פחות משנה הוא לא תמיד תקלת יצרן או התקנה, אלא לעיתים **נזק חשמלי**. הוא שקט, מצטבר, ומפיל מנועים חודשים במקום שנים, ורוב מי שמתקין ממיר אפילו לא יודע שהוא קיים.

ראינו שהפולסים של הממיר אינם סינוס מאוזן. הסכום של שלושת מתחי הפאזות, שברשת נקיה הוא אפס, ביציאת הממיר **אינו אפס**. ההפרש הזה נקרא

מתח מצב-משותף (*common-mode voltage, CMV*). מתח המצב-המשותף נצמד קיבולית דרך הקיבולים הטפיליים שבתוך המנוע (בין הליפופים, הרוטור והגוף) ומופיע כ

מתח על ציר המנוע (*shaft voltage*).

כל עוד מתח הציר נמוך, שכבת הגריז הדקה במיסב מבודדת אותו. אבל ברגע שהמתח עובר את סף הבידוד של שכבת הסיכה, הוא **פורק דרך המיסב כזרם ניצוץ**, תופעה הקרויה **פריקת EDM** (*electrical discharge machining*), אותו עיקרון בדיוק של מכונת ניצוץ שמכרסמת מתכת. ניצוץ בודד אינו מזיק, אבל מדובר ב**אלפי פריקות בשנייה**, יום אחרי יום, וכל פריקה ממסה גומה מיקרוסקופית במסילת המיסב.



איור 20.6 · מנגנון זרמי המיסבים. מתח המצב-המשותף מהממיר נצמד קיבולית מהליפוף אל הציר, ומתח הציר פורק כניצוץ EDM דרך שכבת הגריז במיסב. שני הפתרונות מסומנים בירוק: **מיסב מבודד** בצד הנגדי-להינע (NDE) שובר את לולאת הזרם המעגלי ומגן על המנוע; **טבעת הארקה** בצד ההינע (DE) מנקזת את מתח הציר ומגנה גם על המשאבה. הם משלימים, לא מחליפים.

סכמתי · מבוסס על IEC 60034-25

לא כל זרמי המיסבים זהים. במנוע על ממיר פועלים בו-זמנית שלושה מנגנונים, וההיכרות איתם מסבירה למה הפתרון משתנה לפי גודל המנוע:

זרמי פריקה קיבוליים · EDM

מתח הציר פורק דרך שכבת הגריז כניצוץ. דומיננטי בכל גודל מנוע, ובמיוחד בקטנים. כאן ניקוז מתח הציר (טבעת הארקה) פותר את רוב הבעיה.

זרמים מעגליים · circulating

מתח המצב-המשותף מזרים זרם תדר-גבוה בגוף, שמשרה זרם בלולאה גוף ← מיסב ← ציר ← מיסב ← גוף. **גדל עם גודל המנוע**, ולכן קריטי במנועים גדולים. כאן צריך לבדוד מיסב כדי לשבור את הלולאה.

זרמי הארקה רוטור · rotor-ground

אם הציר מוארק דרך הציוד המונע במסלול עכבה נמוכה יותר מהמנוע, חלק מהזרם זורם דרך מיסבי **המשאבה**. זו הסיבה שלא די להגן רק על המנוע.

איך הנזק נראה, ואיך תופסים אותו בזמן

הנזק מצטבר בשלבים. תחילה מופיע **גימור מט אפרפר** (frosting) על מסילת המיסב, ובהמשך נוצרים **חריצים סדירים** (fluting) מאונכים לכיוון התנועה, מעין "כביש רחיצה" זעיר. זו החתימה הקלאסית של נזק חשמלי, נבדלת לחלוטין מבלאי מכני. התוצאות בשטח: רעש חדש, רעידות, התחממות, התפחמות הגריז, ובסוף כשל מוקדם. החלק המתעתע הוא שהמשאבה ממשיכה לעבוד ושום נורה לא נדלקת, עד שיום אחד המיסב נתקע.

הגשר לפרק הרעידות

נזק זרמי מיסבים מתגלה היטב ב**ניתוח רעידות** (FFT) לפי ISO 20816 (פרק 24). החריצים הסדירים מייצרים תדרים אופייניים בספקטרום עוד לפני שהאוזן שומעת משהו, כך שאפשר לתכנן את החלפת המיסב בנחת במקום להגיע לתקלת חירום. השילוב של בדיקת נצילות (פרק 25) עם ניתוח רעידות באותו יום שטח נותן תמונה מלאה על המנוע והמשאבה כאחד.

שני הפתרונות והפער ביניהם

שני הפתרונות העיקריים פותרים את הבעיה בשתי דרכים שונות, ולכן הם **משלימים זה את זה ולא מחליפים**. זה הבלבול הנפוץ ביותר בנושא, וכדאי לחרוט אותו:

טבעת / מברשת הארקה · drains the voltage

- **מה הוא** · טבעת סיבים מוליכים (למשל AEGIS) או מברשת פחם במגע רציף עם הציר.
- **מה הוא עושה** · מנקז את מתח הציר להארקה לפני סף הפריקה. מותקן בצד ההינע (DE).
- **היתרון** · מגן על מיסב ההינע **וגם** על הציוד המנוע. דורש בדיקה תקופתית בשל שחיקה ולכלוך.

מיסב מבודד · breaks the loop

- **מה הוא** · ציפוי קרמי על טבעת המיסב (INSOCOAT), או מיסב היברידי עם כדורי קרמיקה.
- **מה הוא עושה** · שובר את מסלול הזרם המעגלי דרך המנוע. מותקן לרוב בצד הנגדי-להינע (NDE).
- **המגבלה** · מגן על מיסב המנוע בלבד. מתח הציר עדיין יכול לפרוק דרך מיסב ההינע אל **המשאבה**.

העיקרון המנחה במנוע גדול על ממיר

בודד כדי לשבור את הלולאה, והאראק כדי לנקז. מיסב מבודד לבדו עלול "לדחוף" את הזרם החוצה דרך המשאבה, ולכן הפרקטיקה המומלצת משלבת **מיסב מבודד בצד NDE** יחד עם **טבעת הארקה בצד DE**. מעל לשני אלה, שתי שכבות תשתית עוזרות לכל המערכת: **כבל מנוע מסוכך** עם הארקה היקפית (מסלול חזרה בעל עכבה נמוכה לזרמי תדר-גבוה), **ומסנן ביציאת הממיר** (dV/dt או סינוס) שמקטין את מתח המצב-המשותף ובכך את כל זרמי המיסבים בבת אחת.

טבלת החלטה: מה לדרוש לפי הזנה והספק

הנקודה החשובה ביותר חוזרת: **הגורם מספר אחת לזרמי מיסבים הוא הממיר, לא ההספק לבדו.** מנוע ברשת ישירה כמעט אינו סובל מהם בכל טווח ההספקים הרלוונטי למשאבות; רק במנועים גדולים מאוד (מאות kW, בעיקר 2 קטבים) מופיע מתח ציר משמעותי ממקור מגנטי. הספים שלהלן הם כלל אצבע, ועולים בקנה אחד עם IEC 60034-25, שממליץ על מיסב מבודד NDE למנוע על ממיר ממסגרת 280 ומעלה.

טבלה 20.3 • מה לדרוש נגד זרמי מיסבים, לפי הזנה וגודל מנוע

הזנה	הספק / גודל מנוע	המלצה מעשית
רשת ישירה	kW עד מאות	אין צורך במיסב מבודד או בטבעת הארקה.
רשת ישירה	בעיקר 2 (kW מעל ~500 קטבים)	מיסב מבודד NDE, בדרך כלל סטנדרט יצרן.
ממיר תדר	kW עד ~30	טבעת הארקה כביטוח זול, יחד עם כבל מסוכך ופילטר במידת הצורך.
ממיר תדר	kW ~30-75	לפחות אמצעי אחד, רצוי טבעת הארקה. מיסב מבודד NDE אם המנוע קריטי.
ממיר תדר	(~100-75 kW) + מסגרת 280	סטנדרט IEC 60034-25: מיסב מבודד NDE + טבעת הארקה בצד ההינע.
ממיר תדר	kW מעל ~355	מיסב מבודד NDE + טבעת הארקה, ולשקול מצמד מבודד או מיסב מבודד בשני הצדדים.

יצרני מנועים רבים כבר כוללים מיסב מבודד NDE כסטנדרט ממסגרת 280/315 ומעלה. תמיד יש לעקוב אחר מפרט היצרן ולוודא שהמנוע מוגדר "מתאים להזנת ממיר".

מה לכתוב בהזמנה: מנוע חדש מול מנוע קיים

במנוע **קיים**, טבעת הארקה היא תוספת חיצונית קלה וזולה יחסית להתקנה, והיא מגנה גם על המשאבה, הדרך המהירה להפחית סיכון. מיסב מבודד דורש החלפת מיסב, ולכן משתלם לבצע

בעת שיפוץ או אוברהול. במנוע חדש על ממיר ממסגרת 280 ומעלה, כדאי להזמין את שני האמצעים מראש. שורה אחת בהזמנה חוסכת החלפת מנוע בעוד שנתיים.

מפרט נוסח מומלץ להזמנת מנוע לעבודה עם ממיר תדר

- 1 מנוע מתאים להזנת ממיר תדר לפי NEMA MG-1 Part 31 / IEC 60034-25 (בידוד עומד ב-1600 V פסגה, $0.1 \mu s$).
2 בידוד דרגה F לפחות, מתוכנן לעליית טמפר' דרגה B ("F/B"); בסביבה חמה או מנוע קריטי, דרגה H.
3 מיסב צד נגדי-הינע מבודד (INSOCOAT) + טבעת הארקה לציר בצד ההינע (ממסגרת 280 ומעלה על ממיר).
4 כבל מנוע מסוכך עם הארקה היקפית; לציין את אורך הכבל בפועל.
5 מסנן ביציאת הממיר (dV/dt / סינוס) לפי אורך הכבל (טבלה 20.2), חובה בקידוח עמוק.
6 במשאבת בור: לציין דירוג דחף נדרש למסב הדחף ומנגנון אל-חזור (NRR).

כלל הזהב: ההגנה זולה ביחס לנזק ולהשבתה. **שורה אחת בהזמנה** מול החלפת מנוע שלם בעוד שנתיים.

הנחיות כלליות: רשימת בדיקה למנוע משאבה

- 1 גודל נכון, לא "ליתר ביטחון"
בחר מנוע שנקודת העבודה ב-75%-95% מהספקו (איור 20.2). גודל מדי = נצילות נמוכה + קנס מקדם הספק.

- 2 דרגת IE לפי שעות עבודה
ככל ש-h/yr גבוה, השדרוג ל-IE3/IE4 מחזיר את עצמו מהר יותר (פרק 19, וכלכלה בפרק 27).

- 3 שמורה תרמית
בידוד F/B כמינימום; H במנוע על ממיר, חם או קריטי. ודא אוורור לוח ופינוי חום.

- 4 על ממיר: בידוד מתאים-ממיר
אל תחבר ממיר למנוע ישן בלי לבדוק בידוד. בכבל ארוך, הוסף מסנן יציאה (טבלה 20.2).

5 על ממיר: הגנת מיסבים

טבעת הארקה כמינימום; מיסב מבודד NDE + טבעת ממסגרת 280 (טבלה 20.3). כבל מסוכך תמיד.

6 במשאבת בור (VHS)

בדוק דירוג דחף, מנגנון אל-חזור וכיוון אום. בעבודה על ממיר, הגדר רמפות עצירה מבוקרות.

7 נטר לפני שזה נתקע

ניתוח רעידות תקופתי לפי ISO 20816 תופס fluting ובלאי מיסבים מוקדם (פרק 24).

אז מה? המנוע אינו קופסה שחורה, הוא רכיב שמבינים, בוחרים ומגינים עליו. דרגת ה-IE קובעת בזבז קבוע, אבל מה שקובע אם המנוע **שורד** הוא שלושה דברים שכמעט אף אחד לא מסתכל עליהם: דרגת הבידוד והשמורה התרמית, בידוד מתאים-ממיר נגד מתחי הפסגה, והגנה נגד זרמי מיסבים. במשאבת בור נוסף לכך מנוע הציר החלול, עם מסב הדחף ומנגנון אל-החזור שלו. ברשת ישירה רוב הסיכונים האלה זניחים; ברגע שמוסיפים ממיר תדר, כולם מתעוררים בבת אחת. הבשורה הטובה: כל ההגנות זולות מאוד ביחס לנזק, ורובן מתחילות בשורה אחת נכונה בהזמנה. מי שמכיר את הפרק הזה לא יופתע ממנוע צעיר שנשרף, הוא ימנע אותו מראש.

קישורים בספר

שרשרת הנצילות (מנוע × משאבה × ממיר) בפרק 4. צירים, מסבים DE/NDE ושרוול הציר בפרק 6. דחף צירי ודינמיקה רוטורית בפרק 8. משאבות טורבינה אנכיות ובור בפרק 12. מנוע ההשראה מבחוץ, דרגות IE, מקדם הספק ושיטות התנעה בפרק 19. ויסות ספיקה וחיסכון ה-VFD בפרק שאחרי זה. ניתוח רעידות ISO 20816 ואחזקה חזויה בפרק 24. בדיקת נצילות בשטח בפרק 25. כלכלת החלפת מנוע ושדרוג, NPV ותקופת החזר, בפרק 27.

21 ויסות ספיקה: VFD מול שניקה מול חיתוך מול עוקף

Flow Control: VFD vs Throttling vs Trimming vs Bypass

בקרה

משאבה כמעט אף פעם לא צריכה לתת בדיוק את הספיקה שלשמה תוכננה. הביקוש משתנה לפי שעה, עונה וגידול. השאלה היא **איך מורידים ספיקה**, ולשאלה הזו יש ארבע תשובות: **שניקה** בשסתום, **עוקף** שמחזיר עודף, **חיתוך מאיץ** קבוע, ו**ממיר תדר** שמוריד מהירות. שתיים מהשיטות מבזבזות אנרגיה ושתיים חוסכות אותה; רק אחת מהן חוסכת באופן רציף ומסתגל. **בחירת שיטת הוויסות היא המנוף האנרגטי הבודד הגדול ביותר במשאבה**. הסיבה היא חוק החזקה השלישית מפרק 14: כשמורידים מהירות, הספיקה יורדת לינארית אבל ההספק צונח בחזקת שלוש ($P \propto n^3$). שניקה לא נהנית מהחוק הזה. ממיר כן. הפער, על פני שנה, הוא עשרות אלפי שקלים לכל משאבה.

ארבע דרכים להוריד ספיקה

להוריד ספיקה זה קל. כל ילד עם ברז יודע. להוריד ספיקה **וגם** חשמל, זה כל ההבדל בין שיטה לשיטה, וזה ההבדל בין חשבון חשמל גבוה לנמוך.

נקודת העבודה של משאבה היא תמיד מפגש של שני עקומים: עקום המשאבה ($H-Q$) ועקום המערכת. כדי לשנות את הספיקה, חייבים להזיז אחד מהם. כל אחת מארבע השיטות מזיזה עקום אחר, ובדיוק כאן נקבע אם האנרגיה נחסכת או מתבזבזת. נתחיל ממבט-על קצר, ואז נצלול לכל שיטה.

שניקה *throttling*

סגירה חלקית של שסתום בקו הסניקה כדי להוסיף התנגדות מלאכותית. מזיזה את **עקום המערכת** כלפי מעלה. המשאבה מטפסת על עקום ה- $H-Q$ שלה לעבר ספיקה נמוכה ועומד גבוה יותר.

עוקף *bypass / recirculation*

קו שמחזיר חלק מהספיקה מהסניקה בחזרה ליניקה. המשאבה ממשיכה לתת ספיקה מלאה, ורק חלק ממנה מגיע ללקוח.

חיתוך מאיץ *impeller trim*

הקטנה פיזית וקבועה של קוטר המאיץ (פרק 14). מזיזה את **עקום המשאבה** כלפי מטה, פעם אחת ולתמיד.

ממיר תדר *VFD / variable speed drive*

שינוי תדר החשמל למנוע, ובכך מהירות הסיבוב. מזיז את כל **עקום המשאבה** מטה ושמאלה לפי חוקי הדמיות, רציף ובזמן אמת.

ההבדל המהותי כבר מבצבץ מההגדרות. שניקה ועוקף משאירים את המשאבה מסתובבת במלוא הכוח ורק "זורקים" את העודף, כל אחד בדרכו. חיתוך וממיר משנים את המשאבה עצמה כך שתייצר פחות מלכתחילה. הראשונים מבזבזים, האחרונים חוסכים. כל מה שנשאר הוא להבין כמה, ומתי.

שניקה: רגל על הגז והבלם יחד

שניקה היא השיטה הוותיקה, הזולה להתקנה והנפוצה ביותר, ולכן גם המבזבזת ביותר שעדיין בשימוש המוני. סוגרים חלקית שסתום בקו הסניקה, החיכוך עולה, ועקום המערכת נעשה תלול יותר. נקודת העבודה מחליקה שמאלה לאורך עקום המשאבה: הספיקה יורדת, אבל **העומד שהמשאבה מייצרת דווקא עולה**.

כאן הבזבז. ההפרש בין העומד שהמשאבה מייצרת לבין העומד שהמערכת באמת צריכה נופל כולו על השסתום השנוק, ומתבזבז שם כחום ורעש. הדימוי המדויק הוא נהיגה כשהרגל לוחצת על הגז ועל הבלם בו-זמנית: המנוע עובד קשה, חלק גדול מהעבודה נשרף בבלם, והרכב בקושי מאט. המשאבה עדיין מסתובבת ב-100 אחוז ושואבת כמעט את אותו ההספק, רק כדי לתת פחות מים.

למה ההספק כמעט לא יורד בשניקה

הספק הציר הוא בקירוב $P \propto Q \cdot H$ (חלקי הנצילות). בשניקה, כשהספיקה **יורדת** ב-20 אחוז, העומד **עולה**, ולכן המכפלה $Q \cdot H$ כמעט לא משתנה. בעקומים שטוחים ההספק יכול אפילו לרדת מעט, ובמשאבות עומד גבוה הוא נשאר כמעט קבוע. בכל מקרה אין כאן את צניחת החזקה השלישית. זו בדיוק הסיבה ששניקה היא הבחירה הגרועה אנרגטית.

עוקף: הבזבז המוחלט

בעוקף פותחים קו שמחזיר חלק מהספיקה מהסניקה בחזרה אל היניקה או אל המאגר. המשאבה ממשיכה לתת ספיקה מלאה בנקודת העבודה המקורית, וההספק נשאר במלואו, אבל רק חלק מהמים מגיעים ללקוח. כל הליטרים שחוזרים אחורה נשאבו, קיבלו אנרגיה, ועכשיו נזרקים. זו השיטה הבזבזנית מכולן: לא רק שאין חיסכון, ההספק נשאר מקסימלי בעוד התפוקה המועילה יורדת.

בכל זאת לעוקף יש מקום לגיטימי אחד, ולא לוויסות. קו עוקף **זרימה מינימלית** (min-flow bypass) קיים כדי להגן על המשאבה: כשהביקוש צונח כמעט לאפס, העוקף מבטיח שזרם מינימלי ימשיך לעבור דרך המשאבה כדי למנוע התחממות ורה-סירקולציה (נושא שנחזור אליו בסוף הפרק). זה שימוש הגנתי נכון. שימוש בעוקף כשיטת ויסות שגרתית הוא תקלה תכנונית.

חיתוך מאיץ · מתי כן

- **עודף קבוע וידוע** · המשאבה גדולה מדי באופן קבוע, והעומד או הספיקה גבוהים מהנדרש לאורך כל הזמן.
- **פתרון זול וסופי** · עלות חד-פעמית של חיתוך וכיוון, בלי רכיב חשמלי שיתקלקל. ראה פרק 14.
- **חוסך אנרגיה אמיתית** · ההספק יורד לפי חוק הקוטר בחזקת שלוש, בדומה לממיר אך באופן קבוע.

חיתוך מאיץ · המגבלה

- **בלתי-הפיך** · אי-אפשר "להחזיר" מתכת. אם הביקוש יעלה בעתיד, צריך מאיץ חדש.
- **נקודה אחת בלבד** · מתאים לעודף קבוע, לא לביקוש שמשתנה לאורך היום.
- **גבול קיצוץ** · מתחת לכ-80% מהקוטר המקורי הנצילות צונחת והעקום מתעוות (פרק 14).

ממיר תדר: המנוף הגדול

ממיר תדר משנה את תדר החשמל שמגיע למנוע, וכך את מהירות הסיבוב. כאן נכנסים **חוקי הדמיות (affinity laws)** מפרק 14 במלוא עוצמתם. כשמהירות הסיבוב יורדת מ- n_1 ל- n_2 , שלושת גדלי הביצועים נגררים אחריה, כל אחד בחזקה אחרת.

נוסחה 21.1 · חוקי הדמיות לוויסות מהירות

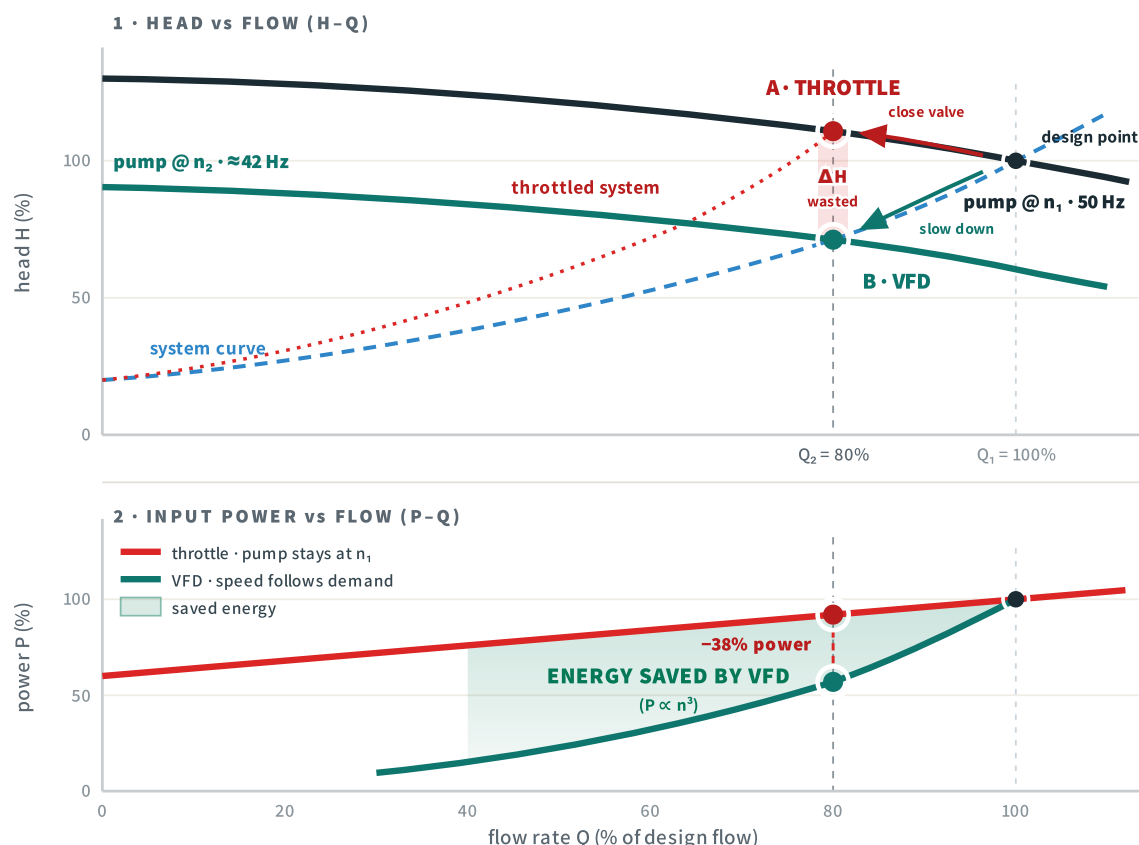
$$Q_2 = Q_1 \cdot (n_2/n_1) \quad | \quad H_2 = H_1 \cdot (n_2/n_1)^2 \quad | \quad P_2 = P_1 \cdot (n_2/n_1)^3$$

n_2/n_1	יחס המהירויות. בממיר, מהירות פרופורציונית לתדר, ולכן $n_2/n_1 = f_2/f_1$ (למשל $42 \text{ Hz} / 50 \text{ Hz} = 0.84$).
Q	הספיקה יורדת לינארית עם המהירות.
H	העומד יורד עם ריבוע המהירות.
P	ההספק יורד עם חזקה שלישית של המהירות. זה כל הסיפור האנרגטי.

כדי להרגיש את עוצמת החזקה השלישית, מספיק מספר אחד. ירידה של 10 אחוז במהירות ($n_2/n_1 = 0.90$) מורידה את ההספק ב- $27\% = 1 - 0.90^3$. ירידה של 20 אחוז במהירות חותכת כמעט **חצי** מההספק ($49\% = 1 - 0.80^3$). שינוי קטן במהירות, חיסכון עצום בחשמל. זה הקסם ששניקה לעולם לא תוכל להציע.

ההשוואה האנרגטית: אותה ספיקה, שני עולמות

הדרך הטובה ביותר להבין את הפער היא לצייר את שתי השיטות על אותה מפת עקומים. נתחיל בנקודת תכנון בספיקה מלאה, ונבקש להוריד את הספיקה. שתי הדרכים מגיעות לאותה ספיקה חדשה, אבל בעומד שונה ובהספק שונה לחלוטין.



איור 21.1 • אותה הורדת ספיקה מ- Q_1 ל- Q_2 , בשני לוחות. למעלה (H-Q): בשניקה המשאבה נשארת על עקום המהירות המלאה ומטפסת לנקודה A, וכל הרצועה האדומה ΔH נשרפת על השסתום; בממיר העקום כולו צונח לפי חוקי הדמיות אל נקודה B, בדיוק על עקום המערכת. למטה (P-Q): ההספק הנקלט בשניקה (אדום) כמעט אינו יורד, בעוד שעם ממיר (טורקיז) הוא צונח בחזקה השלישית. השטח הירוק הוא האנרגיה הנחסכת, כ-38% פחות הספק באותה ספיקה.

סכמטי • להמחשת מקור החיסכון, לא בקנה מידה

איך לקרוא את האיור בשטח

המרחק האנכי בין נקודה A לנקודה B הוא העומד שהסתום שורף לחינם בשניקה. ככל שעקום המערכת תלול יותר (רוב העומד הוא חיכוך), המרחק הזה גדול והממיר חוסך הרבה. ככל שעקום המערכת שטוח ומתחיל גבוה (עומד סטטי דומיננטי), המרחק קטן וגם הממיר חוסך פחות. זו בדיוק התובנה של הסעיף הבא.

מצבי בקרה של ממיר התדר

ממיר תדר לבדו רק מסובב את המנוע. מה שהופך אותו לכלי ויסות חכם הוא **לולאת הבקרה**: חיישן מודד גודל כלשהו, ובקר משווה אותו ליעד ומכוון את התדר עד שהם נפגשים. לכל יישום יש מצב בקרה מתאים, וטעות בבחירתו מבטלת חלק גדול מהחיסכון.

1

לחץ קבוע (constant pressure)

חיישן בקו הסניקה, והבקר שומר לחץ קבוע ביציאת המשאבה. פשוט ונפוץ למערכות הגברת לחץ ולמערכות מים עירוניות. החיסרון: כשהצריכה רחוקה, איבודי החיכוך בקו עולים והלקוח הרחוק מקבל לחץ נמוך.

2

הפרש לחץ קבוע (constant ΔP)

החיישן מודד הפרש לחץ על פני צרכן מרוחק, והבקרה שומרת אותו קבוע. מבטיח שכל צרכן מקבל את מה שצריך, גם הרחוק. נפוץ במערכות מיזוג אוויר ובלולאות חימום-קירור.

3

לחץ פרופורציונלי (proportional pressure)

יעד הלחץ **יורד** ככל שהספיקה יורדת, לאורך קו ישר. בכך הבקרה מחקה את ירידת החיכוך האמיתית במערכת ומורידה מהירות עוד יותר בשעות ביקוש נמוך. החיסכון הגדול ביותר ברוב המערכות הסגורות.

4

מעקב ביקוש (demand following)

הבקרה עוקבת אחר מדד תפעולי ישיר: מפלס מאגר, ספיקה נדרשת או אות SCADA. המשאבה נותנת בדיוק את מה שצריך ברגע נתון. הצורה הנקייה ביותר של ויסות, נפוצה בתחנות שאיבה למאגרים.

לחץ פרופורציונלי מול לחץ קבוע

ההבדל בין השניים הוא לא ניואנס. במערכת סגורה עם עומד סטטי אפסי, מעבר מ"לחץ קבוע" ל"לחץ פרופורציונלי" יכול להוסיף עוד 10–30% חיסכון, כי הוא מאפשר למשאבה לרדת למהירויות נמוכות הרבה יותר בשעות הביקוש הנמוך. במערכת פתוחה עם הרמה לגובה קבוע (עומד סטטי גבוה), היתרון הזה כמעט נעלם, כי אסור לרדת מתחת לעומד שמרים את המים. תמיד להתאים את מצב הבקרה לפרופיל העומד.

מתי ממיר תדר לא משתלם

ממיר תדר אינו תרופת פלא, וזו אבחנה שמפרידה בין ממונה אנרגיה מנוסה למוכר ציוד. החיסכון תלוי כמעט כולו ב**פרופיל העומד הסטטי**: כמה מהעומד הכולל הוא הרמה קבועה לגובה, וכמה הוא חיכוך שגדל עם הספיקה.

ממיר חוסך הרבה כאשר

- **עומד סטטי נמוך, חיכוך דומיננטי** - עקום מערכת תלול. הורדת מהירות מורידה מיד את העומד הנדרש, וחוק החזקה השלישית עובד במלואו. מערכות סגורות (מיזוג, סינון, סחרור).
- **ביקוש משתנה** - המשאבה רצה שעות רבות בעומס חלקי, לא רק בשיא. שם החיסכון מצטבר.
- **שעות עבודה רבות** - ככל ש-h/yr גבוה, החיסכון השנתי גדול וההחזר מהיר.

ממיר חוסך מעט או לא משתלם כאשר

- **עומד סטטי גבוה** - הרמה לגובה קבוע. אי-אפשר לרדת מתחת לעומד הסטטי, ולכן הורדת המהירות מוגבלת והחיסכון קטן. עדיף לעיתים start-stop או חיתוך מאיץ.
- **עבודה רציפה בספיקה מלאה** - אם המשאבה תמיד צריכה את ה-BEP, אין מה לווסת, והממיר רק מוסיף הפסדי המרה של 2-3%.
- **מנועים קטנים מאוד** - במנועים זעירים מחיר הממיר ביחס לחיסכון גבוה, וההחזר מתארך מעבר לכדאי.

מלכודת העומד הסטטי

שתי משאבות בור זהות, אחת מרימה 10 m סטטי ועוד 40 m חיכוך, השנייה מרימה 45 m סטטי ועוד 5 m חיכוך. אותו עומד כולל 50 m, אבל בראשונה ממיר חוסך מצוין, ובשנייה הוא כמעט חסר טעם, כי הורדת מהירות קטנה כבר מורידה את העומד מתחת ל-45 m הנדרשים והמים פשוט מפסיקים לזרום. **לפני שממליצים על ממיר, תמיד מפרקים את העומד לסטטי מול חיכוך.** זו הבדיקה החשובה ביותר בפרק.

טבלה 21.1 - ארבע שיטות ויסות הספיקה במבט מהיר (כלי עזר)

שיטה	חוסכת אנרגיה?	עלות הקמה	גמישות	מתי לבחור
שניקה (throttle)	לא - ההספק נשאר גבוה	נמוכה	רציפה	פתרון זמני, ספיקה זניחה, תקציב אפס
עוקף (bypass)	לא - הגרועה ביותר	נמוכה	רציפה	רק להגנת זרימה מינימלית, לא לוויסות
חיתוך מאיץ (trim)	כן - קבוע	נמוכה	נקודה אחת	עודף קבוע וידוע, בלי צורך בשינוי עתידי
ממיר תדר (VFD)	כן - הגדול ביותר	בינונית-גבוהה	רציפה, בזמן אמת	ביקוש משתנה + עומד סטטי נמוך + שעות רבות

תחנת שאיבה במתח גבוה (מ"ג) מפעילה משאבה שצורכת 30 kW בספיקה מלאה. בפועל היא צריכה לעבוד רוב הזמן בכ-80% מהספיקה. מפעילים אותה 4,000 שעות בשנה. נשווה את שני הפתרונות: הורדת ספיקה בשניקה לעומת הורדתה בממיר.

$$\begin{aligned} \text{hrs} &= 4,000 \text{ h/yr} & Q_2/Q_1 &= 0.80 \rightarrow n_2/n_1 = 0.80 & P_1 &= 30 \text{ kW (הספק ציר בספיקה מלאה)} \\ \eta_{\text{motor}} &= 0.93; \eta_{\text{VFD}} &= 0.97 & \text{tariff} &= 0.40 \text{ kWh/ש"מ (ללא מע"מ)} \end{aligned}$$

1 הספק עם ממיר, לפי חוק החזקה השלישית (נוסחה 21.1):

$$P_{\text{VFD}} = 30 \cdot 0.80^3 = 30 \cdot 0.512 = 15.36 \text{ kW}$$

2 הספק עם שניקה: המשאבה רצה במלוא המהירות, ההספק כמעט לא יורד. נניח שמרני $\approx 92\%$ –95% (באיור 21.1 מצויר 92%):

$$P_{\text{throttle}} \approx 30 \cdot 0.95 = 28.50 \text{ kW}$$

3 הספק חשמלי נכנס (קיר): שניקה דרך מנוע בלבד, ממיר דרך מנוע + ממיר:

$$\begin{aligned} E_{\text{thr}} &= 28.50 / 0.93 = 30.65 \text{ kW} ; E_{\text{VFD}} = 15.36 / \\ & (0.93 \cdot 0.97) = 17.03 \text{ kW} \end{aligned}$$

4 הפרש ההספק והאנרגיה השנתית:

$$\Delta P = 30.65 - 17.03 = 13.62 \text{ kW} \rightarrow 13.62 \cdot 4,000 \approx 54,470 \text{ kWh/yr}$$

5 חישוב כספי שנתי (0.40 kWh/ש"מ): שנה / 21,790 ≈ 54,470 · 0.40 =

תוצאה: מעבר משניקה לממיר חוסך **בשנה 21,800 ש"מ** ≈ במשאבה אחת בלבד. אם הממיר עולה כ-18,000 ש"מ מותקן, ההחזר הוא כ-10 חודשים (שנה ≈ 0.83 18,000 / 21,790). אחרי פחות משנה, כל שקל הוא רווח נקי.

למה הפער כל כך גדול? שני אפקטים מצטברים. ראשית, החזקה השלישית: הורדת מהירות של 20 אחוז חותכת 49% מהספק הציר. שנית, השניקה אפילו לא מורידה את ה-95 אחוז שלה. אם המשאבה עובדת 8,760 שעות (רציף), אותו חישוב מגיע לכ-47,700 ש"מ בשנה. כל שעת עבודה נוספת מגדילה את הפער.

סייג הגינות

החישוב מניח עומד סטטי נמוך, כך שחוק החזקה השלישית תקף כמעט במלואו. במערכת עם עומד סטטי גבוה הירידה בהספק תהיה מתונה יותר מ- 0.80^3 , והחיסכון קטן יותר. לכן **תמיד מפרקים את העומד לסטטי מול חיכוך לפני שמבטיחים מספר ללקוח** (מלכודת העומד הסטטי למעלה). את החישוב המלא עם עלות מחזור-חיים והחזר מהוון נראה בפרק 27.

הגבול התחתון: זרימה מינימלית רציפה

הורדת מהירות אינה חופשית כלפי מטה. לכל משאבה צנטריפוגלית יש **זרימה מינימלית רציפה** (*minimum continuous flow*), ספיקה שמתחתיה אסור להריץ אותה לאורך זמן. כשהספיקה צונחת קרוב לאפס, הנוזל מסתחרר בתוך המאיץ בלי לעבור דרכו, נוצרות רה-סירקולציה ומערבולות, האנרגיה שמושקעת הופכת לחום, והנוזל הלכוד מתחמם. במשאבה אטומה לחלוטין מול שסתום סגור, המים יכולים להגיע לרתיחה תוך דקות ולהרוס את האטם ואת המאיץ.

שלושה איסורים סביב המינימום

- **אסור להריץ מול שסתום סגור** · ספיקה אפסית = כל ההספק הופך לחום בתוך המשאבה. נזק תוך דקות.
- **אסור לרדת מתחת למינימום היצרן** · לרוב 10–25% מ-BEP. מתחתיו: רה-סירקולציה, רעידות ושחיקת קוויטציה (פרק 15).
- **בממיר, לבדוק את המינימום בכל מהירות** · כשמורידים מהירות, נקודת המינימום זזה. הבקרה חייבת לדעת לעצור או לפתוח עוקף הגנתי לפני שחוצים אותו.

לכן, כשהביקוש צונח מתחת לזרימה המינימלית, הפתרון אינו להמשיך להאט עד אפס, אלא לעבור **להפעלה לסירוגין** (start-stop) או לפתוח קו **עוקף זרימה מינימלית** שמבטיח זרם מגן דרך המשאבה. כאן, ורק כאן, העוקף הוא כלי נכון. שילוב נכון של ממיר לטווח הביקוש הרגיל ועוקף הגנתי לקצה התחתון נותן גם חיסכון מקסימלי וגם בטיחות. בנוסף לספיקת המינימום, לממיר עצמו יש גם מהירות מינימום (בדרך כלל 25–50% מהנקובה, לקירור המנוע ולאטימה תקינה), ויש להגדיר פסי-דילוג (skip bands) סביב תדרי תהודה של המערכת.

10-25%

זרימה מינימלית מ-BEP · גבול תחתון אסור לחצות

~0.8

שנים להחזר השקעת ממיר · h/yr 4,000

21.8K ₪

חיסכון שנתי ממיר מול שניקה · דוגמה 21.1

-49%

הספק בהורדת 20% מהירות ($P \propto n^3$)

אז מה? שיטת הוויסות היא ההחלטה האנרגטית הבודדת הגדולה ביותר במשאבה. מתוך ארבע הדרכים, שניקה ועוקף משאירים את המשאבה רצה במלוא הכוח וזורקים את העודף, ולכן מבזבזים. חיתוך מאיץ וממיר משנים את המשאבה עצמה, ולכן חוסכים. ממיר מנצח כשהעומד הסטטי נמוך, הביקוש משתנה ושעות העבודה רבות, ואז הוא מחזיר את עצמו לרוב בתוך פחות משנתיים. אבל אל תבטיח חיסכון לפני שפירקת את העומד לסטטי מול חיכוך, ולעולם אל תרד מתחת לזרימה המינימלית. כלל אצבע אחד למתקן קיים: אם אתה רואה שסתום שנוק קבוע על קו הסניקה, אתה מסתכל על 20,000 ש"ח בשנה שנשרפים על ברז. זו ההזדמנות הראשונה שממונה אנרגיה מחפש.

קישורים בספר

חוקי הדמיות וחיתוך המאיץ, הבסיס לכל הפרק, בפרק 14. בחירת המנוע ומאפייני הממיר עצמו (נצילות, הרמוניות, מצבי בקרה) בפרק 19. עקומי המאפיין של המשאבה בפרק 13; עקום המערכת ונקודת העבודה בפרק 16. הזרימה המינימלית, רה-סירקולציה וקוויטציה בפרק 15. החישוב הכלכלי המלא, עלות מחזור-חיים והחזר מהוון, בפרק 27.

22 מעברים ובטיחות הידראולית

Transients & Hydraulic Safety

בקצרה

רוב התקלות הקטסטרופליות במערכות שאיבה אינן קורות בעבודה הרגילה אלא ב**מעברים**: רגע ההתנעה, רגע העצירה, ובעיקר רגע הכשל הפתאומי. השינוי המהיר במהירות הזרימה יוצר **פטיש מים** (water hammer), גל לחץ שנע בצינור במהירות הקול ויכול להגיע לפי כמה מלחץ העבודה.

הכלי הכמותי המרכזי הוא **נוסחת ז'וקובסקי**: $\Delta p = \rho \cdot a \cdot \Delta v$. הפרק מסביר אותה, את מהירות הגל בצינור, את הצורך ב**פריימינג** וטיפול באוויר, את תפקיד ה**שסתום האל-חוזר**, ואת ארגז הכלים של אמצעי ההגנה שמונעים אסון. התרחיש המסוכן ביותר הוא נפילת מתח בקו הולכה ארוך, ועליו נשען כל הפרק.

למה מעברים מסוכנים יותר מהעבודה הרגילה

מים הם כמעט בלתי דחיסים. עצירה פתאומית של עמודת מים נעה היא כמו עצירת רכבת בקיר בטון. כל האנרגיה הקינטית חייבת ללכת לאנשהו, והיא הופכת ללחץ.

בעבודה יציבה (פרק 16) הזרימה קבועה והלחצים מאוזנים. אבל ברגע שמשוה משתנה במהירות, ספיקה שצונחת, שסתום שנסגר, משאבה שנעצרת, מהירות הנוזל בצינור משתנה, והשינוי הזה הוא שמייצר את הסכנה. ככל שהשינוי מהיר יותר, גל הלחץ חזק יותר. זו הסיבה ש**מעבר** (hydraulic transient), אירוע קצר של מעבר ממצב יציב אחד לאחר, הוא הרגע שבו צינורות מתפוצצים, אוגנים נשברים ומשאבות מסתובבות לאחור.

שלושה אירועי מעבר טיפוסיים מסכנים מערכת שאיבה. ה**תנעה**: המשאבה מתחילה לדחוף מים לתוך קו שעד עכשיו עמד. **עצירה מבוקרת**: סוגרים שסתום או מכבים את המשאבה בכוונה. **כשל**: הפסקת חשמל פתאומית עוצרת את המשאבה בלי כל אזהרה. מבין השלושה, הכשל הוא הקטלני, כי הוא היחיד שבו אין שליטה על קצב השינוי.

פטיש מים (הלם מים) water hammer / surge

גל לחץ חד שנע הלך ושוב בצינור במהירות הקול, ונוצר כשינוי מהיר בספיקה בולם עמודת מים בתנועה. הלחץ הרגעי יכול להכפיל ולשלוש את לחץ העבודה.

מהירות הגל wave speed / celerity (a)

המהירות שבה גל הלחץ נע בתוך הצינור. למים בצינור פלדה אופייני 1000–1300 m/s. תלויה בדחיסות הנוזל ובגמישות הצינור.

עומד יניקה חיובי / שלילי flooded / lift suction

אם המקור מעל המשאבה, היניקה "מוצפת" והמשאבה מתמלאת מעצמה. אם המשאבה מעל המקור, צריך פריימינג פעיל.

נוסחת ז'וקובסקי: כמה לחץ נוצר

בשנת 1898 פרסם ניקולאי ז'וקובסקי את הנוסחה שמכמתת את פטיש המים, אחרי שחקר התפוצצויות צינורות במערכת המים של מוסקבה. הנוסחה פשוטה להפליא, ובדיוק לכן היא כלי שדה כל כך חזק: עליית הלחץ המרבית תלויה רק בצפיפות הנוזל, במהירות הגל, ובכמה מהירות הזרימה השתנתה.

נוסחה 22.1 • עליית הלחץ של ז'וקובסקי

$$\Delta p = \rho \cdot a \cdot \Delta v \quad | \quad \Delta H = a \cdot \Delta v / g$$

Δp	עליית הלחץ הרגעית [Pa]. חלקי 10^5 לקבלת בָּאָר.
ρ	צפיפות הנוזל. למים $1000 \text{ kg/m}^3 \approx$.
a	מהירות הגל בצינור [m/s] (נוסחה 22.2).
Δv	השינוי במהירות הזרימה [m/s]. בעצירה מלאה $\Delta v = v_0$, מהירות העבודה כולה.
ΔH	אותה עלייה במונחי עומד מים [m], נוחה יותר לתכנן ולהשוואה ללחץ העבודה.

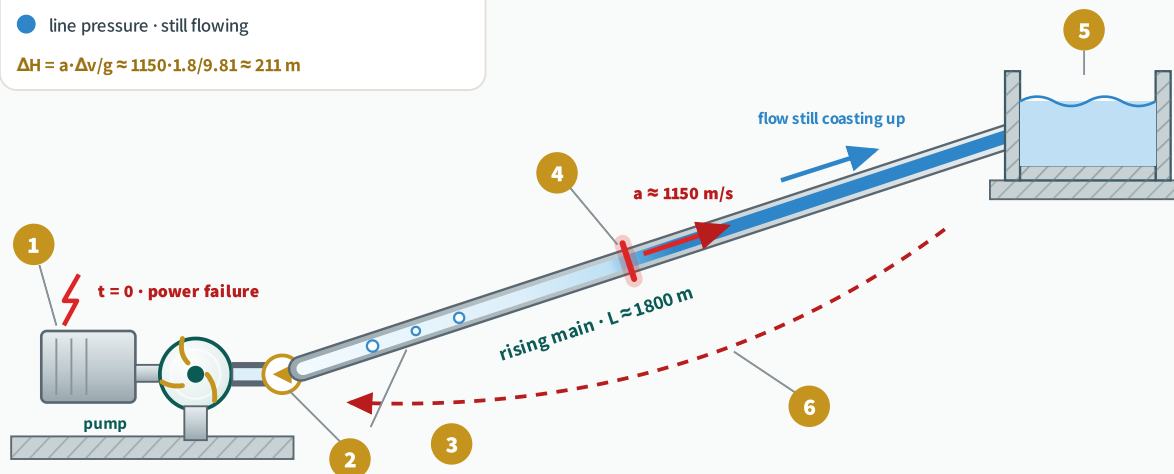
הקריאה ההנדסית של ז'וקובסקי

שים לב למה **לא** מופיע בנוסחה: אורך הצינור. עליית הלחץ המרבית אינה תלויה בו כלל (הקוטר משפיע רק בעקיפין, דרך היחס D/e שקובע את מהירות הגל בנוסחה 22.2). צינור ארוך אינו יוצר לחץ גבוה יותר מצינור קצר באותה מהירות. מה שהאורך כן קובע הוא **כמה זמן** נמשך הגל וכמה קשה למתן אותו. לחץ של 200 m שמופיע לרבע שנייה בקו קצר אפשר לבלוע. אותו לחץ שחוזר ונשנה לאורך קו של קילומטרים הוא שמפוצץ אותו.

איך הגל נע: התרחיש של נפילת מתח

הדרך הברורה ביותר להבין פטיש מים היא לעקוב אחרי גל אחד בקו הולכה (**קו עולה** (*rising main*)) ברגע שהמשאבה נופלת. ברגע $t=0$ המנוע מאבד מתח, מומנט הסיבוב נעלם, והמשאבה מפסיקה לדחוף. עמודת המים בקו, שעדיין נעה כלפי מעלה בתנופה, מתחילה להאט. נוצר אזור של לחץ נמוך (אפילו לחץ אדים, פרק 15) ליד המשאבה, והגל הזה רץ במעלה הקו עד המאגר, חוזר כגל לחץ גבוה, ומטיח בשסתום האל-חוזר. כך נולד פטיש מים.

○ low pressure · flow decelerating
 ● line pressure · still flowing
 $\Delta H = a \cdot \Delta v / g \approx 1150 \cdot 1.8 / 9.81 \approx 211 \text{ m}$



1 power loss at $t = 0$ · 2 check valve closes · 3 low-pressure / vapor zone
 4 wavefront travels at a · 5 reflection at the reservoir · 6 return flow slams the valve

איור 22.1 · מסע הגל בקו עולה אחרי נפילת מתח, עם קידוד צבע של הלחץ במים: ליד המשאבה הקטע החיוור הוא אזור הלחץ הנמוך (עד בועות אדים), והכחול במעלה הקו עדיין זורם בלחץ העבודה. חזית הגל (אדום) רצה אל המאגר במהירות a , מתהפכת שם לגל לחץ גבוה, והזרימה החוזרת (החץ המקווקו) מטיחה בשסתום האל-חוזר שכבר נסגר. זו ההטחה (slam) ששוברת ציוד.

סכמטי · להמחשת רצף האירועים, לא בקנה מידה

מהירות הגל: למה צינור גמיש מציל

נוסחת ז'וקובסקי דורשת ערך אחד לא טריוויאלי, מהירות הגל a . במים פתוחים ובלתי-מוגבלים מהירות הקול היא כ- 1480 m/s . אבל בצינור אמיתי הקירות נמתחים מעט בכל פעם שהלחץ עולה, וההתמתחות הזו "בולעת" חלק מהגל ומאיטה אותו. ככל שהצינור גמיש יותר, מהירות הגל נמוכה יותר, ולפי ז'וקובסקי גם הלחץ נמוך יותר. זו תובנה הנדסית חשובה: **חומר הצינור הוא כלי הגנה.**

נוסחה 22.2 · מהירות הגל (קורטווג)

$$a = \sqrt{K/\rho} / \sqrt{1 + (K/E) \cdot (D/e)}$$

K מודול הנפח של הנוזל. למים $\approx 2.2 \text{ GPa}$. הביטוי $\sqrt{K/\rho} \approx 1480 \text{ m/s}$ הוא מהירות הקול במים חופשיים.

E מודול היאנג של חומר הצינור: פלדה $\approx 210 \text{ GPa}$, ברזל יציקה ≈ 100 , PVC ≈ 3.3 , PE ≈ 1 .

D / e קוטר פנימי חלקי עובי דופן. צינור דק-דופן גמיש יותר ומאט את הגל יותר.

טבלה 22.1 • מהירות גל אופיינית לפי חומר צינור (כלי עזר)

חומר צינור	E (GPa)	A אופייני (M/S)	השפעה על פטיש המים
פלדה (steel)	210	1000-1300	גל מהיר וחזק, דורש הגנה
ברזל יציקה (ductile iron)	100-170	1000-1200	דומה לפלדה
אסבסט-צמנט (A/C)	~ 24	900-1100	שביר, רגיש לפיצוץ
PVC קשיח	3.3	300-500	גל איטי, לחץ נמוך בהרבה
פוליאתילן (HDPE)	~ 1	200-350	הכי "סלחני" לפטיש מים

למה HDPE כמעט לא מפחד מפטיש מים

בצינור פלדה ($a \approx 1200$) עצירה של זרם ב-2 m/s יוצרת $\Delta H \approx 245$. באותו תרחיש בצינור HDPE ($a \approx 300$) העלייה היא רק $\Delta H \approx 61$, פי ארבעה פחות. הצינור הגמיש מותח את עצמו וסופג את הגל. לכן בקווי הולכה שבהם פטיש מים מדאיג, מעבר ל-HDPE או PVC הוא לעיתים פתרון ההגנה הזול ביותר, עוד לפני שמתקינים כלי לחץ.

תחנת שאיבה מזרימה מים בקו עולה מפלדה לעבר מאגר. עומד הסטטי 72 m. אירעה נפילת מתח והמשאבה נעצרה מיידית. נחשב את עליית הלחץ ונבדוק אם הקו בסכנה.

$$a = 1150 \text{ m/s} \text{ (פלדה DN350)} \quad v_o = 1.8 \text{ m/s} \text{ (מהירות עבודה)} \quad L = 1800 \text{ m} \text{ (אורך הקו)}$$

$$H_{\text{static}} = 72 \text{ m} \quad \rho = 1000 \text{ kg/m}^3, g = 9.81$$

1 $\Delta v = v_o = 1.8 \text{ m/s}$ עצירה מלאה, לכן

2 עליית הלחץ של ז'וקובסקי (נוסחה 22.1):

$$\Delta p = \rho \cdot a \cdot \Delta v = 1000 \cdot 1150 \cdot 1.8 = 2,070,000 \text{ Pa} = 20.7 \text{ bar}$$

3 אותה עלייה במטרים:

$$\Delta H = a \cdot \Delta v / g = 1150 \cdot 1.8 / 9.81 = 211 \text{ m}$$

4 הלחץ הכולל בשיא הגל: $H_{\text{peak}} = 72 + 211 = 283 \text{ m} \approx 28 \text{ bar}$

תוצאה: שיא הלחץ **283 m** מול עומד עבודה של 72 m בלבד. הקו חווה כמעט **פי 4** מלחץ העבודה. **פיצוץ הקו, שבירת אוגנים או הרס שסתום האל-חוזר כמעט ודאיים** ללא הגנה. וזאת מלבד אזור לחץ-האדים בצד היניקה, שעלול לקרוס חזרה בהטחה שנייה (column separation).

ועכשיו הפתרון: למה לא לעצור מהר. נניח שבמקום עצירה מיידית מאריכים את זמן הבלימה של הזרם ל- $T_{\text{stop}} = 15 \text{ s}$ (למשל בעזרת גלגל תנופה או שסתום אטי). ראשית נחשב את הזמן הקריטי t_c , זמן הלון-ושוב של הגל:

$$t_c = 2L / a = 2 \cdot 1800 / 1150 = 3.13 \text{ s}$$

מאחר שזמן הבלימה $T_{\text{stop}} = 15 \text{ s}$ גדול בהרבה מהזמן הקריטי $t_c = 3.13 \text{ s}$, הבלימה "אטית" והלחץ קטן בקירוב ביחס t_c / T_{stop} : **$\Delta H \approx 211 \cdot (3.13/15) \approx 44 \text{ m}$** . שיא הלחץ צונח ל- $72 + 44 = 116$ m, בתחום שהקו יכול לשאת. **אותו קו בדיוק, רק זמן בלימה ארוך יותר, וההבדל הוא בין פיצוץ לבין מעבר רגוע.**

הלקח: המפתח להגנה הוא להפוך שינוי מהיר לשינוי אטי. כל אמצעי ההגנה בהמשך הפרק עושים בדיוק את זה, כל אחד בדרכו.

נפילת מתח היא התרחיש שהורג תחנות

בעצירה מבוקרת אפשר לסגור שסתום לאט ולכבות את המשאבה בהדרגה. אבל **נפילת מתח** עוצרת את המשאבה כמעט מיידית, בתוך פחות משנייה, כי לרוטור יש מעט מאוד אינרציה משלו. המים זורמים אחורה ומטיחים בשסתום האל-חוזר ברגע שהוא נסגר. זה התרחיש שמפיל הכי הרבה קווי הולכה. **כל תכן של קו הולכה ארוך חייב לכלול ניתוח פטיש מים (transient analysis) להפסקת חשמל, ולא רק לסגירת שסתומים.** בדוק אותו לתרחיש הגרוע: מהירות עבודה מלאה, אפס אינרציה, וקו ארוך.

פריימינג: למה משאבה צנטריפוגלית לא שואבת אוויר

מעבר נוסף, שקט יותר אך הרסני לא פחות לאורך זמן, קורה בהתנעה. משאבה צנטריפוגלית מעבירה אנרגיה לנוזל בעזרת כוח צנטריפוגלי, וכוח זה תלוי בצפיפות. אוויר קל פי 800~ ממים, ולכן מאיץ שמסתובב בגוף מלא אוויר יוצר לחץ זניח, לא מספיק כדי לשאוב מים מצינור היניקה. המשאבה פשוט "מקציפה" את האוויר במקום, מתחממת, והאטם המכני מתייבש ונשרף. זו **ריצה יבשה (dry running)**.

הפתרון הוא **פריימינג (priming)**, מילוי גוף המשאבה וצינור היניקה במים לפני ההתנעה, וסילוק כל האוויר הכלוא. ארבע שיטות נפוצות, לפי מבנה המתקן.

1 יניקה מוצפת (flooded suction)

המקור מעל המשאבה, והמים ממלאים אותה בכוח הכובד. השיטה הפשוטה והבטוחה ביותר. תמיד עדיפה כשאפשר למקם את המשאבה מתחת למפלס המקור.

2 שסתום תחתי + מילוי (foot valve)

שסתום אל-חוזר בקצה צינור היניקה מחזיק את הקו מלא מים גם כשהמשאבה דוממת. ממלאים פעם אחת ידנית, ואז הקו נשאר טעון. נפוץ ביניקת הרמה ממאגר פתוח.

3 פריימינג ואקום / אז'קטור (vacuum / ejector)

משאבת ואקום קטנה או אז'קטור שואבים את האוויר מגוף המשאבה ומושכים מים פנימה. נפוץ בתחנות גדולות עם הרמת יניקה משמעותית.

4 תכן תחל-עצמי (self-priming)

גוף משאבה מיוחד שמחזיק כיס מים פנימי ומגרש את האוויר מעצמו תוך כמה סיבובים. הרחבה בפרק 12.

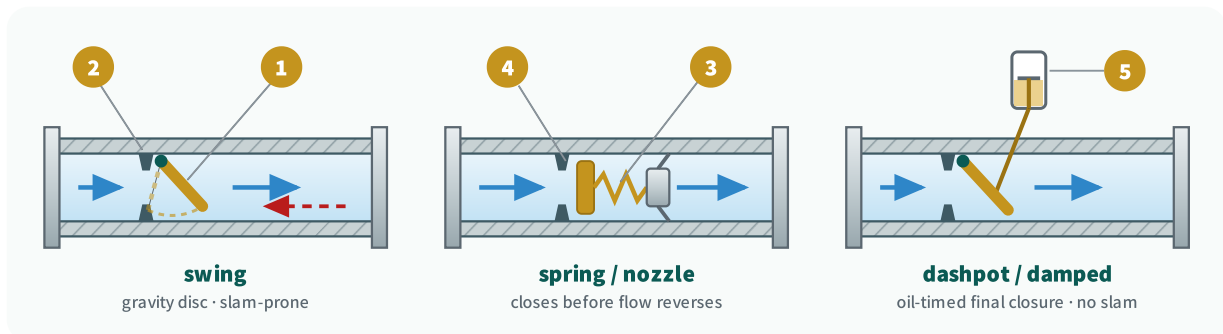
אוויר כלוא וכיסי אוויר

גם בקו מלא, אוויר יכול להצטבר בנקודות הגבוהות של הקו ולחסום אותו חלקית (air-locking). כיס אוויר מקטין את שטח החתך הזמין, מעלה את החיכוך, ולעיתים מנתק לגמרי את הזרימה. לכן בקווי הולכה ארוכים מתקנים **שסתומי אוויר** (air valves) בכל פסגה מקומית, שמשחררים אוויר כשהקו מתמלא וקולטים אוויר כשהוא מתרוקן. שסתום אוויר חסום הוא סיבה נפוצה ל"משאבה שמזרימה פחות מהצפוי" בלי שום תקלה במשאבה עצמה.

שסתומים אל-חוזרים והטחת השסתום

השסתום האל-חוזר (check valve / NRV) מאפשר זרימה בכיוון אחד בלבד וחוסם אותה בכיוון ההפוך. כשהמשאבה נעצרת, הוא מונע מהמים שכבר הורמו לזרום אחורה דרך המשאבה ולסובב אותה לאחור (reverse rotation), מצב שיכול לפרק את המאיץ או לשרוף את המנוע אם הוא מתניע מחדש לתוך רוטור מסתובב.

אבל יש פרדוקס: שסתום אל-חוזר **שנסגר מהר מדי** הוא עצמו מקור לפטיש מים. אם הזרם כבר התחיל לזרום אחורה והשסתום נטרק בבת אחת על עמודת מים נעה, נוצרת הטחה (**check-valve slam**) עם גל ז'וקובסקי משלה. הכלל: השסתום צריך להיסגר **בדיק** כשהזרימה מתאפסת, לא מאוחר מדי ולא מוקדם מדי. לכן בוחרים את סוג השסתום לפי מאפייני המעבר של הקו.



1 hinged disc · 2 seat ring · 3 closing spring · 4 guided disc · 5 oil dashpot · blue = forward flow · red = reverse flow at trip

איור 22.2 · שלושה שסתומים אל-חוזרים בחתך, באותו קו זרימה (כחול = זרימה קדימה, אדום מקווקו = הזרם החוזר בנפילת מתח). ה-swing (משמאל) זול אך הדסקה נסגרת בכוח הכובד לאורך קשת ארוכה (מסומנת בקו מקווקו), ולכן הזרם החוזר מספיק להיבנות ונוטרק בהטחה. שסתום קפיץ/חרירי (אמצע) נסגר על ידי הקפיץ עוד לפני שהזרם מתהפך, וההטחה קטנה. שסתום מבוקר-בולם (מימין) נסגר מהר ברוב הדרך ומואט בבולם שמן בקטע האחרון, וההטחה מתבטלת כמעט לחלוטין. בקווים ארוכים זו הבחירה.

סכמטי · עקרון פעולה, לא בקנה מידה

מה שסתום אל-חוזר נכון נותן

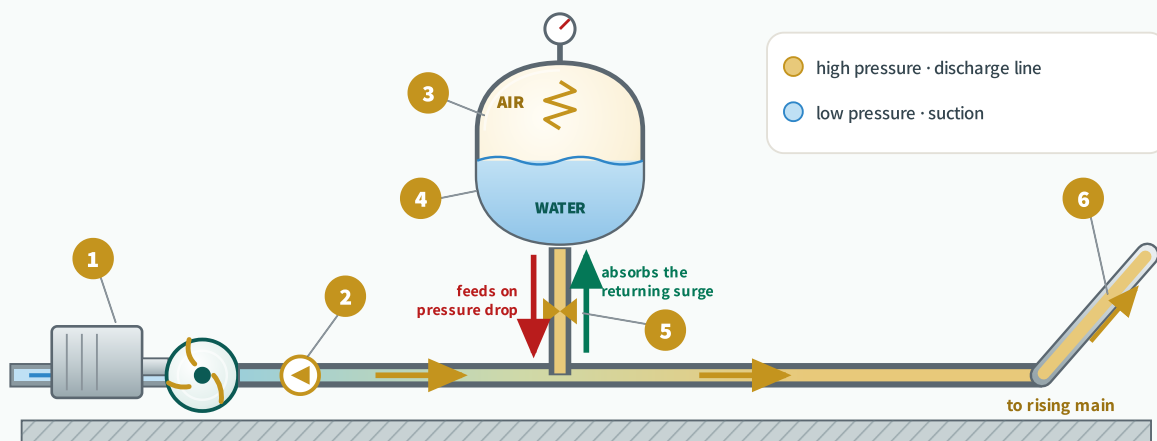
- מונע סיבוב לאחור · שומר על המאיץ ועל המנוע מהזרימה החוזרת.
- שומר את הקו טעון · המים נשארים בקו ההולכה, אין צורך בפריימינג חוזר.
- מגן על המשאבה · מבודד אותה מלחץ הקו במורד כשהיא דוממת.

איפה שסתום שגוי מזיק

- הטחה (slam) · שסתום swing איטי נטרק על זרם הפוך ויוצר פטיש מים בעצמו.
- איבוד עומד · שסתום עם התנגדות גבוהה אוכל מטרים יקרים בכל שעת עבודה.
- תקיעה · שסתום מוזנח נתקע פתוח (אין הגנה) או סגור (אין זרימה).

ארגז הכלים: אמצעי ההגנה מפני פטיש מים

כל אמצעי ההגנה עושים אותו דבר ביסודם: הם מאיטים את השינוי, הופכים בלימה פתאומית לבלימה הדרגתית. ההבדל ביניהם הוא איך ואיפה. הנפוץ והחזק שבהם בקווי הולכה הוא **כלי לחץ** (air vessel / hydropneumatic accumulator), מיכל סגור עם כרית אוויר דחוס מעל המים, מותקן ביציאת המשאבה.



איור 22.3 · כלי לחץ (air vessel) ביציאת המשאבה, עם קידוד צבע של הלחץ: יניקה כחולה, קו סניקה זהוב. כרית האוויר הדחוס מעל המים פועלת כקפיץ (המד למעלה מציג את לחץ הטעינה): כשהמשאבה נופלת והלחץ בקו צונח, הכלי **דוחף מים לקו** וממלא את החלל במקום שייווצר ואקום; כשהגל חוזר בלחץ גבוה, הכרית **נדחסת וסופגת** אותו. כך השינוי החד הופך להדרגתי, וגל ז'וקובסקי נחתך.

סכמטי · פריסת הגנה אופיינית לקו הולכה, לא בקנה מידה

אמצעי	איך הוא עובד	מתאים במיוחד ל
כלי לחץ / מיכל אוויר (air vessel)	כרית אוויר דחוס סופגת ומזרימה מים, חותכת את הגל בשני הכיוונים	קווי הולכה ארוכים, נפילות מתח, הפתרון החזק ביותר
מגדל איזון (surge tank)	עמוד מים פתוח שעולה ויורד במקום לבלום	קווים בגרביטציה / מנהרות, עומד נמוך-בינוני
גלגל תנופה (flywheel)	מוסיף אינרציה לרוטור, מאריך את זמן העצירה אחרי נפילת מתח	תחנות שאיבה, הופך עצירה פתאומית להדרגתית
שסתום בולם הלם (surge anticipator)	נפתח לפריקה רגעית בזיהוי ירידת לחץ, ומשחרר את גל ההטחה	השלמה לכלי לחץ בקווים קריטיים
שסתום אל-חוזר מבוקר (dashpot)	סגירה מתוזמנת שמונעת הטחה בשסתום עצמו	כל קו עם סכנת check-valve slam
רמפת VFD / רכה (soft-start)	האטה והאצה הדרגתיות במקום מדרגה	התנעה ועצירה מבוקרות (לא מגן בנפילת מתח)

VFD מגן בעצירה מבוקרת, לא בנפילת מתח

ממיר תדר (פרק 21) הוא כלי מצוין למעבר חלק: רמפת האצה והאטה הופכת התנעה ועצירה ממדרגה חדה לעקומה רכה, ומבטלת את פטיש המים של עבודה יומיומית. אבל יש כאן מלכודת חשובה: **בנפילת מתח גם ה-VFD מאבד חשמל** ואינו יכול לבצע רמפה. לכן ה-VFD מגן מפני המעברים המתוכננים, אך אינו מחליף כלי לחץ או גלגל תנופה בתרחיש הקריטי של הפסקת חשמל. שני סוגי ההגנה נחוצים, כל אחד לתרחיש שלו.

סדר תכן ההגנה בשטח

- חשב את גל ז'וקובסקי לתרחיש הגרוע**
 נפילת מתח, מהירות עבודה מלאה, אפס אינרציה. אם $H_{static} + \Delta H$ מתחת ללחץ התכן של הקו, אולי אין צורך בהגנה אקטיבית.
- בדוק קודם את הזול: חומר ומהירות**
 הורדת מהירות העבודה (קוטר גדול יותר) או צינור גמיש יותר (PE/PVC) מקטינים את הגל בלי ציוד נוסף.
- בחר שסתום אל-חוזר מתאים למעבר**
 בקו ארוך, שסתום מבוקר-בולם (dashpot) במקום swing פשוט, כדי למנוע הטחת שסתום.
- הוסף כלי לחץ או גלגל תנופה**
 בקו ארוך עם נפילות מתח, כלי לחץ ביציאה הוא ההגנה המרכזית. גלגל תנופה משלים בהארכת זמן העצירה.

חבילת ניתוח (method of characteristics) מאמתת שכל נקודה בקו נשארית בין לחץ אדים ללחץ התכן, לאורך כל המחזור.

אז מה? המעברים מסוכנים יותר מהעבודה, ופטיש מים בנפילת מתח הוא הורג התחנות השקט. נוסחת ז'וקובסקי $\Delta p = \rho \cdot a \cdot \Delta v$ מראה בשורה אחת שכל שינוי מהיר במהירות הזרימה הופך ללחץ עצום, ושהקו הארוך הוא שמסכן אותו לאורך זמן. ההגנה כולה היא רעיון אחד: להפוך שינוי מהיר לאטי. שסתום אל-חוזר נכון, כלי לחץ, גלגל תנופה, וחומר צינור גמיש, כל אחד עושה זאת בדרכו. עשרים דקות של חישוב ז'וקובסקי בשלב התכן חוסכות קו הולכה שמתפוצץ בלילה הראשון של הפסקת חשמל.

קישורים בספר

אזור לחץ-האדים שנוצר בצד היניקה אחרי נפילת מתח קשור ישירות לקוויטציה ולהפרדת עמודה (column separation) בפרק 15. חיבור משאבות בטור ובמקביל בפרק 18, ועקום המערכת בפרק 16. ממיר התדר, רמפות ההאצה וההתנעה הרכה בפרק 21. רעידות מוגברות שמעידות על מעברים חוזרים ועל הטחות שסתום מאובחנות בניטור מצב בפרק 24.



חלק שמיני

התקנה, אחזקה ובדיקות

Installation, O&M, Testing & Troubleshooting

התקנה והרצה 23

תפעול, אחזקה וניטור מצב 24

בדיקות נצילות ותקנים 25

איתור תקלות 26

23 התקנה והרצה

Installation & Commissioning

בקצרה

אפשר לבחור את המשאבה המושלמת ולהרוס אותה בשבוע ההתקנה. **יסוד חלש, יישור לקוי או צנרת יניקה גרועה** יגרמו לרעידות, לבלאי מסבים ולכשל מוקדם, ולא חשוב כמה טובה המשאבה שמתחת לכל זה. רוב מה שנקרא בשטח "תקלת משאבה" נולד כאן, לא במאיץ. הפרק עובר בסדר הביצוע על ארבעה דברים שהמתקין שולט בהם: **יסוד ועיגון · יישור מצמד · צנרת יניקה וסניקה · תכן בריכת יניקה**, וסוגר **ברשימת תיוג להרצה** שלוכדת את מדידת הבסיס. עשרים דקות של עבודה נכונה כאן חוסכות שנים של קריאות שירות.

למה ההתקנה היא חצי מאורך החיים

משאבה היא מכונה מסתובבת. כל רפיון ביסוד הופך לרעידה, כל אי-יישור הופך לעומס מחזורי על המסב, וכל כיס אוויר ביניקה הופך לקוויטציה. כל אלה נקבעים בשבוע ההתקנה.

היצרן מספק עקום מאפיין נקי שנמדד על מתקן בדיקה אידיאלי. בשטח, אותה משאבה בדיוק תיתן ביצועים אחרים לגמרי אם הותקנה רשלנית. שלושה מנגנונים מתרגמים התקנה גרועה לכשל: **רעידות** שמכרסמות מסבים ואטמים (פרק 24), **עומסים על האוגנים** מצנרת לא נתמכת שמעוותים את גוף המשאבה ומשנים את מרווחי הריצה (פרק 5), **ואוויר ביניקה** שמוריד NPSH וגורר קוויטציה (פרק 15). שלושתם מתחילים פה.

בסיס משותף · *baseplate / common bedplate*

פלטת הפלדה הקשיחה שעליה מורכבים המנוע והמשאבה יחד. תפקידה לשמור על היישור ביניהם. מעוגנת אל יסוד בטון ומוזרקת במילוי.

מילוי · *grout*

תערובת מלט או אפוקסי שיוצקים מתחת לבסיס המשותף כדי למלא את החלל בינו לבין הבטון, להעביר עומסים ולמנוע תנודה.

יישור · *shaft alignment*

התאמת ציר המנוע לציר המשאבה כך ששני הצירים על אותו קו, ללא הסטה מקבילה וללא זווית. נמדד על המצמד.

רגל רכה · *soft foot*

מצב שבו אחת מרגלי המכונה אינה נחה במלואה על הבסיס. הידוק הבורג מעקם את הגוף ומכניס אי-יישור פנימי.

יסוד, עיגון ומילוי

היסוד הוא הבלם של כל האנרגיה המסתובבת. אם הוא קל מדי או חלול, הוא מתחיל לרטוט בתדר ההפעלה ומגביר את הרעידות במקום לבלוע אותן. כלל האצבע הקלאסי של תעשיית המשאבות: **מסת יסוד הבטון צריכה להיות בערך פי שלושה עד חמישה ממשקל המשאבה והמנוע יחד**. ככל שהמתקן גדול יותר ומהיר יותר, נוטים לקצה העליון של הטווח.

נוסחה 23.1 • מסת יסוד מינימלית

$$m_{\text{foundation}} = k \cdot (m_{\text{pump}} + m_{\text{motor}})$$

k מקדם המסה. 3 למתקנים קטנים ואיטיים, 5 ומעלה למתקנים גדולים ב-2950 rpm או לבסיס שאינו על קרקע מוצקה.
m_{pump} משקל המשאבה כולל הנוזל שבתוכה [kg].
m_{motor} משקל המנוע והמצמד [kg].

אחרי שהבטון התקשה, מציבים את הבסיס המשותף, מפלסים אותו בעזרת טריזים או ברגי פילוס, ומהדקים את ברגי העיגון **ברגי עוגן** (*anchor bolts*) אל הבטון. הצעד שהכי קל לדלג עליו והכי יקר להחמיץ הוא **המילוי**: יוצקים גראוט מתחת לכל שטח הבסיס כדי לבטל את החלל שבינו לבין הבטון. בסיס שלא מולא יושב על כמה נקודות מגע בלבד, רוטט ביניהן, ומאבד את היישור תוך חודשים. מילוי אפוקסי מודרני נצמד חזק יותר, ועמיד בפני שמן ומים יותר ממילוי מלט.

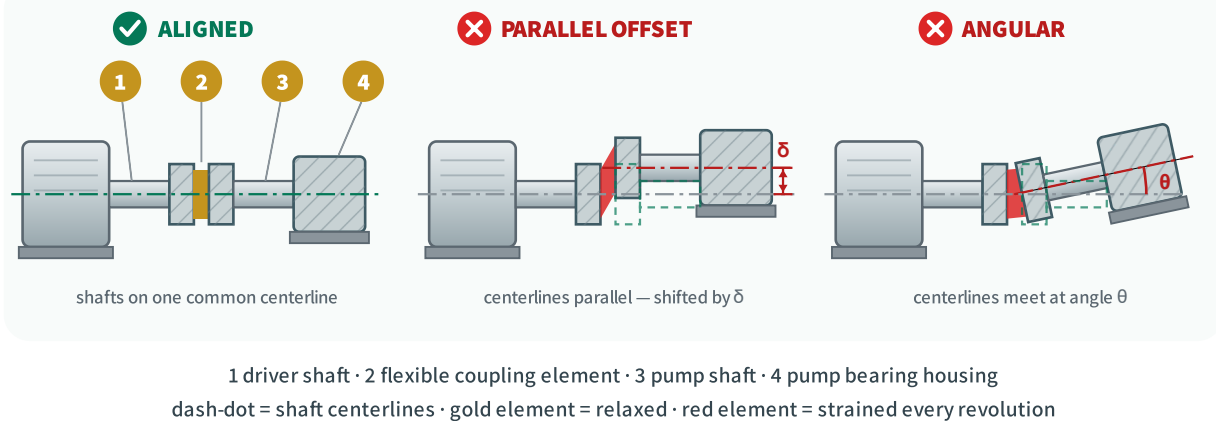
מפלסים, מהדקים, ואז מיישרים

סדר הפעולות חשוב. קודם מפלסים את הבסיס המשותף עצמו (פני ההשוואה המעובדים אופקיים בשני הצירים, סבולת סביב 0.05–0.10 mm/m), אחר כך מהדקים את ברגי העוגן בעומס אחיד ובדפוס מסודר, ורק בסוף, אחרי שהמילוי התקשה, מבצעים את יישור המצמד. יישור על בסיס שעוד "זז" הוא בזבוז זמן, כי הוא ישתנה ברגע שהמילוי יתפוס.

יישור מצמד

אחרי שהבסיס יציב, מגיע השלב הקריטי ביותר מבחינת אורך חיים: **יישור** (*alignment*) בין ציר המנוע לציר המשאבה. שני הצירים מחוברים **במצמד** (*coupling*) (פרק 6). אם הם אינם על אותו קו, המצמד מעביר עומס מחזורי לכל סיבוב, והעומס הזה מתורגם ישירות לבלאי מסבים ולכשל אטמים. **אי-יישור הוא אחת הסיבות הנפוצות ביותר לכשל מסבים בשטח**.

שני סוגי אי-יישור קיימים, ובדרך כלל הם מופיעים יחד. **הסטה מקבילה** (*parallel / offset*) היא כששני הצירים מקבילים אך מוזזים זה ביחס לזה. **הסטה זוויתית** (*angular*) היא כשהצירים נפגשים בזווית. שניהם נמדדים על המצמד, וצריך לתקן את שניהם בו-זמנית.



איור 23.1 · שלושת מצבי המצמד במבט צד. משמאל, המצב התקין (ירוק): שני הצירים על קו מרכז אחד ואלמנט המצמד הגמיש (זהב) רגוע. במרכז, הסטה מקבילה: הצירים מקבילים אך מוזזים ב- δ , והאלמנט (אדום) נמתח בכל סיבוב. מימין, הסטה זוויתית: הצירים נפגשים בזווית θ . קו מקווקו ירוק מסמן את המיקום הנכון. בשטח שני הסוגים מופיעים כמעט תמיד יחד, ומתקנים את שניהם במדידה אחת על המצמד.

סכמטי · מבט צד, לא בקנה מידה

לייזר, לא סרגל, ובחום

פעם יישור עם סרגל ומד-חוגה. היום הסטנדרט המקצועי הוא **יישור לייזר** (*laser alignment*): שני ראשי לייזר על שני חצאי המצמד מודדים את ההסטה לכל זווית סיבוב ומחשבים בדיוק כמה לזיז כל רגל. זה מהיר, חוזר על עצמו ומדויק למאית המילימטר. שתי מלכודות שטח חשובות:

1 בדוק רגל רכה לפני הכול

אם רגל אחת לא נחה על הבסיס, כל יישור ייכשל. משחררים בורג אחד בכל פעם ומודדים אם המכונה "קופצת". מתקנים בפלטות מילוי והתאמה (shims) עד שכל הרגליים נושאות.

2 פצה על התפשטות תרמית

מנוע חם וצינור חם מתרוממים. יישור מושלם בקור הופך לאי-יישור בעבודה. ליישומי מים בטמפרטורת סביבה ההשפעה קטנה, אך בקווי קירור או שאיבת נוזל חם מיישרים עם היסט תרמי מחושב מראש, כך שהמתקן מתיישר כשהוא חם (פרק 6).

כלל אצבע ליעד היישור

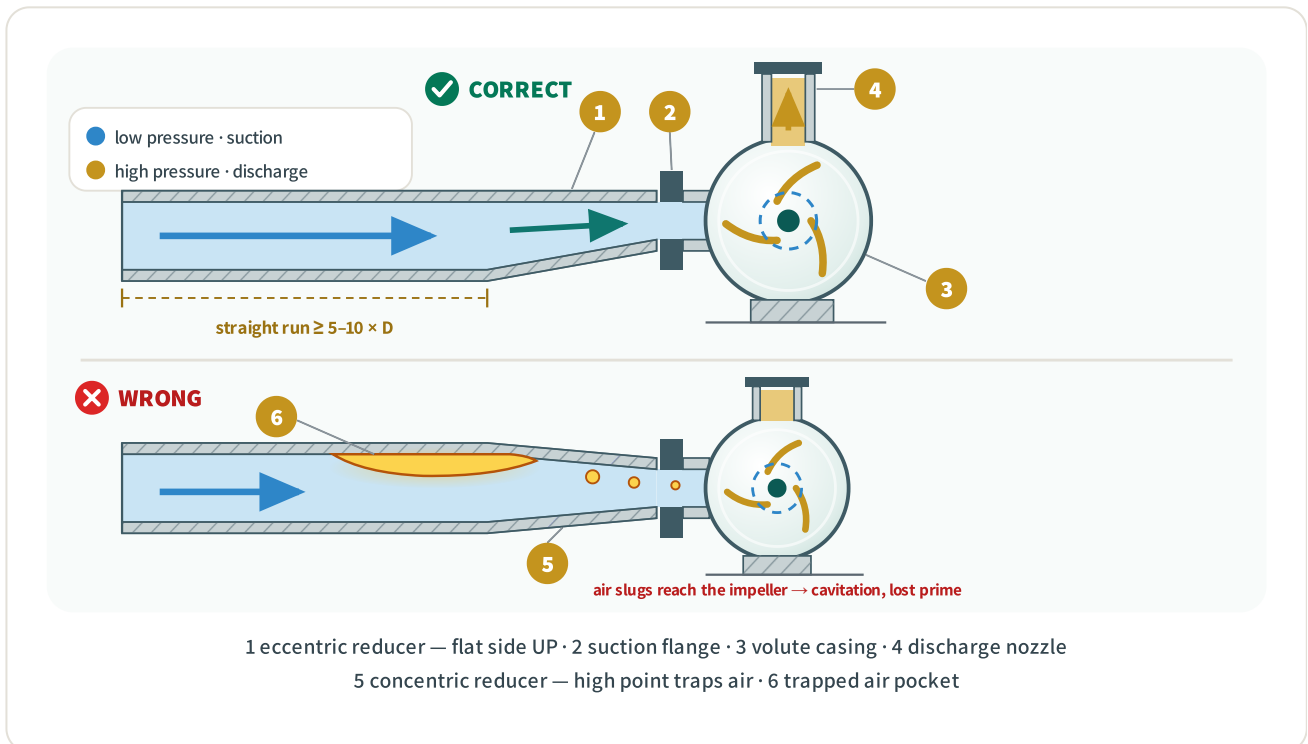
יעד טוב למצמד גמיש סטנדרטי הוא הסטה מתחת ל- $0.05\text{--}0.10\text{ mm}$ במצמדים איטיים, ומתחת ל- $0.03\text{--}0.05\text{ mm}$ במתקני 2950 rpm . ככל שהסיבוב מהיר יותר, הסבולת לאי-יישור קטנה. אל תסמוך על "מספיק קרוב". כל עשירית מילימטר נוספת מתורגמת לכוח מחזורי שפועל פעמיים בכל סיבוב, אלפי פעמים בדקה.

צנרת יניקה: מקור התקלות מספר 1 בשטח

אם יש מקום אחד שבו התקנה גרועה הורגת משאבות, זו צנרת היניקה. כל מרפק, כל מסנן וכל הצרה מוסיפים איבוד חיכוך ומורידים את ה-NPSH הזמין (פרק 15), וכל כיס אוויר הופך לבועה שנשאבת אל המאיץ. הצד היונק רגיש בדיוק כי הלחץ בו נמוך, ושם כל טעות מתפוצצת. ארבעה כללים מכסים את רוב הסיפור.

מעבר אקסצנטרי עם הצד השטוח למעלה

זו הטעות הקלאסית והכי שכיחה. כשמקטינים קוטר לפני אוגן היניקה, חייבים **מעבר אקסצנטרי (eccentric reducer)**, מעבר שאינו סימטרי, כשהצד השטוח שלו פונה כלפי מעלה. כך הקו העליון של הצינור נשאר ישר ושטוח ואין מקום שבו אוויר יכול להצטבר ולהיכלא. מעבר **קונצנטרי (concentric)** או אקסצנטרי הפוך יוצר "כיס" בחלק העליון, שבו אוויר נאסף עד שגוש שלם נשאב פתאום אל המשאבה וגורם לאובדן יניקה ולקוויטציה.



איור 23.2 · צנרת יניקה בחתך, נכון מול שגוי. למעלה (נכון): מעבר אקסצנטרי עם הצד השטוח כלפי מעלה: הגג ישר לכל האורך ואין מקום שאוויר יכול להיכלא בו, ולפני המעבר קטע ישר של $5-10 \times D$ שמיישר את הזרימה. קידוד הצבע: כחול = יניקה בלחץ נמוך, זהב = סניקה בלחץ גבוה. למטה (שגוי): מעבר קונצנטרי (סימטרי) יוצר נקודה גבוהה שבה נאסף כיס אוויר (ענבר זוהר), וגושי אוויר נשאבים אל המאיץ, קוויטציה ואובדן יניקה.

סכמטי · עיקרון "flat side up", לא בקנה מידה

קטע ישר לפני האוגן, וקוטר שלא יורד מתחת לכניסת המשאבה

הזרימה שמגיעה אל עין היניקה צריכה להיות אחידה ולא מסוחררת. מרפק צמוד לאוגן היניקה מזרים מים לא-סימטריים אל המאיץ, ומייצר עומס רדיאלי, רעידות ופגיעה ב-NPSH. הכלל המעשי: **קטע צינור ישר באורך של לפחות 5 עד 10 קטרים ($5-10 \times D$) לפני אוגן היניקה**, כדי לתת לזרימה "להירגע". כלל שני, פשוט אך מופר לעיתים קרובות: **אסור שקוטר צינור היניקה**

יקטן מקוטר כניסת המשאבה. צינור יניקה תמיד שווה או גדול מקוטר הכניסה, אחרת מאיצים את הנוזל ומורידים את הלחץ עוד לפני שהגיע למשאבה.

תמיכה בצנרת, לא דרך המשאבה

צינור מלא מים כבד מאוד. אם משקלו וכוחות ההתפשטות התרמית שלו נשענים על אוגני המשאבה, הם מעוותים את גוף המשאבה, משנים את מרווחי הריצה הפנימיים ומכניסים אי-יישור לציר. **הצנרת חייבת להיתמך בתמיכות עצמאיות**, כך שאוגן המשאבה נושא אך ורק את האוגן הנגדי, ללא משקל וללא מאמץ. **מפרקי התפשטות** (*expansion joints*) סופגים את התנועה התרמית, אבל חובה לקבע אותם במוטות קשירה או לעגן את הקו סמוך להם; מפרק לא מקובע מעביר את דחף הלחץ במלואו אל אוגן המשאבה.

חמש מלכודות בצד היניקה

- **מעבר קונצנטרי או הפוך** · יוצר כיס אוויר. תמיד אקסצנטרי, צד שטוח למעלה.
- **מפרק צמוד לאוגן היניקה** · זרימה מסוחררת אל המאיץ. שמור $10 \times D - 5$ קטע ישר.
- **צינור יניקה צר מדי** · מאיץ את הנוזל ושורף NPSH. קוטר $\leq$ כניסת המשאבה.
- **מסנן יניקה סתום** · מוסיף איבוד חיכוך נסתר. נקה לפני ההרצה ונטר אחריה.
- **צנרת נשענת על המשאבה** · מעוותת את הגוף ומשנה מרווחים. תמיכות עצמאיות תמיד.

צנרת סניקה

צד הסניקה סלחני יותר כי הלחץ בו גבוה, אך גם לו יש כללים. **הסדר הנכון** של האביזרים, מהמשאבה החוצה, הוא: תחילה **אל-חוזר** (*check valve*), ואחריו **מגוף ניתוק** (*isolation valve*). השסתום האל-חוזר קרוב למשאבה מונע זרימה חוזרת ו**מכת מים** (*water hammer*) כשהמשאבה נעצרת, ושומר על המשאבה מלאה כדי שלא תאבד את המילוי (*prime*). מגוף הניתוק שאחריו מאפשר לבודד את המשאבה לאחזקה בלי לרוקן את כל הקו, וגם משמש לשניקת הספיקה בזמן ההרצה.

גם בצד הסניקה הצנרת נתמכת בנפרד, ומפרק התפשטות סופג את התנועה התרמית. כשהקו ארוך ובו מסת מים גדולה, שוקלים אמצעי הגנה נוספים מפני מכת מים: שסתום אל-חוזר עם סגירה רכה, משכך הלם (בולם זעזועים) או כלי לחץ. נושא מכת המים והגנת הקו נדון בהרחבה בפרק 22.

מיקום	אביזר	תפקיד עיקרי
צד יניקה, לפני האוגן	מעבר אקסצנטרי (צד שטוח למעלה)	הקטנת קוטר ללא כיס אוויר
צד יניקה	מגוף ניתוק (פתוח מלא בעבודה)	בידוד לאחזקה. לעולם לא שונקים ביניקה
צד סניקה, ראשון	שסתום אל-חוזר	מניעת זרימה חוזרת ומכת מים, שמירת המילוי
צד סניקה, שני	מגוף ניתוק	בידוד לאחזקה, שניקה בזמן הרצה
שני הצדדים	מפרק התפשטות + תמיכות	ספיגת תנועה תרמית, הורדת עומס מהאוגנים

לעולם לא שונקים בצד היניקה

זה כלל ברזל. כדי לכוון ספיקה בהרצה, שונקים תמיד במגוף הסניקה, אף פעם לא במגוף היניקה. שניקה ביניקה מורידה את הלחץ בכניסה למאיץ ומפילה ישירות את ה-NPSH הזמין אל מתחת לנדרש, מה שמייצר קוויטציה מידית (פרק 15). מגוף היניקה צריך להיות פתוח לחלוטין בכל זמן עבודה. אם צריך להגביל זרימה, זה תמיד בצד הסניקה.

תכן בריכת יניקה ומניעת מערבולות

בתחנות שאיבה שמושכות מבריכה פתוחה, בור רטוב (*wet pit*) או תעלה, תכן הבריכה (*sump / intake*) הוא קריטי לא פחות מהמשאבה עצמה. בריכה מתוכננת גרוע יוצרת מערבולות (*vortices*) שיורדות אל פתח היניקה ושואבות אוויר אל המשאבה, וכן זרימה לא אחידה שמעמיסה על המאיץ. התוצאה: רעידות, רעש, אובדן ביצועים ובלאי מואץ. נושא הבור הרטוב ותצורות ההתקנה האנכיות נדון בפרק 12.

שלושה פרמטרים שולטים ברוב המקרים: עומק טבילה מינימלי מעל פתח היניקה כדי שמערבולת לא תיצור משפך אוויר עד הפתח, זרימת גישה ישרה ואחידה אל המשאבה (בלי פניות חדות ממש לפני הכניסה), ומרחקים מהקירות ומהקרקעית. כשהמערבולת בלתי נמנעת, מוסיפים מפצלי זרימה (*baffles / vortex breakers*) או צלב מתחת לפעמון היניקה כדי לשבור אותה.

נוסחה 23.2 • עומק טבילה מינימלי (כלל מעשי)

$$S = D \cdot (1 + 2.3 \cdot F_D) \quad , \quad F_D = v / \sqrt{g \cdot D}$$

S	עומק הטבילה מפני המים עד מרכז פתח היניקה [m].
D	קוטר פעמון היניקה [m].
v	מהירות הזרימה בפתח היניקה [m/s]. שאיפה 1.5–1.7 m/s ≤.
F_D	מספר פרוד של הפתח, יחס בין מהירות לכוח כובד. נוסחת Hydraulic Institute ANSI/HI 9.8.

לתחנה גדולה עם כמה משאבות בבור משותף, אינטראקציות הזרימה מורכבות מכדי לנחש. כדאי **מודל פיזי בקנה מידה** או סימולציית CFD לפני היציקה. עלות המודל זניחה מול עלות פירוק ובנייה מחדש של בור שמייצר מערבולות. בתחנות קטנות עם משאבה אחת, כללי ANSI/HI מספיקים בדרך כלל.

רשימת תיוג להרצה

אחרי שהכול מותקן, מגיע רגע האמת: ההפעלה הראשונה. כאן ההזדמנות האחרונה לתפוס טעות לפני שהיא הופכת לנזק. עוברים על רשימה מסודרת, לפי הסדר, בלי לדלג. שלב שמדלגים עליו כאן עולה ביוקר אחר כך.

טבלה 23.2 • רשימת תיוג להרצה ראשונה (commissioning checklist)

#	בדיקה	מה מוודאים	סיכון אם מדלגים
1	יישור מאומת ומתועד	בלייזר, בתנאי עבודה, רגל רכה תוקנה	כשל מסבים, דליפת אטם
2	מילוי, עיגון, אוגנים	מילוי תפס, ברגי עוגן הדוקים, אין מאמץ צנרת על האוגנים	רעידות, עיוות גוף
3	כיוון סיבוב	הרצה רגעית כשהמנוע מנותק מהמשאבה (מצמד מפורק), או חיווי כיוון. תיקון בהחלפת שתי פאזות	ביצועים נמוכים, נזק אם רץ הפוך בעומס
4	מילוי המשאבה ושחרור אוויר	משאבה וצינור יניקה מלאים מים, אוורור פתוח עד שיוצא נוזל	הרצה יבשה, הרס אטם מכני
5	מצב מגופים בהתנעה	מגוף יניקה פתוח מלא. מגוף סניקה מותאם לסוג המשאבה: רדיאלית מתניעים מול מגוף סגור או מעט פתוח (ההספק מזערי בספיקה אפס); אקסיאלית ו-Ns גבוה מתניעים מול מגוף פתוח, כי ההספק שלהן דווקא עולה בספיקה אפס (פרק 13)	עומס יתר או חימום בספיקה אפס
6	NPSH וזרימה מינימלית	נקודת העבודה מעל זרימת המינימום ובמרווח NPSH בטוח	קוויטציה, רה-סירקולציה
7	מדידת בסיס	זרם, מתח, לחץ יניקה וסניקה, רעידות, טמפרטורות מסב, רעש	אין קו ייחוס לניטור עתידי

הרצה יבשה הורסת אטם מכני בשניות

הסכנה החמורה ביותר בהרצה היא **הפעלה ללא נוזל**. האטם המכני (פרק 7) מסתמך על קרום נוזל דק בין פניו לסיכה ולקירור. ברגע שמפעילים יבש, הפנים מתחממים, נשרפים ונהרסים תוך שניות, ולעיתים גם המאיץ והטבעות. לכן **מילוי מלא לפני ההתנעה הוא חובה מוחלטת, לא המלצה**: ממלאים את המשאבה ואת צינור היניקה במים, פותחים את ברז האוורור עד שיוצא נוזל רציף בלי בועות, ורק אז מתניעים. במשאבות בור טבולות זה פחות קריטי כי הן מתחת למים, אך במשאבות משטחיות זו טעות שאי אפשר לתקן.

דוגמה 23.1 • מדידת בסיס בהרצה, טביעת אצבע של מתקן בריא

בוסטר משטחי חדש הותקן והותנע. כדי לקבוע קו ייחוס לניטור עתידי (פרק 24), מבצעים מדידת בסיס בנקודת העבודה: קוראים מתח, זרם ומקדם הספק בלוח, וכן ספיקה ועומד. נחשב את ההספק החשמלי, ההספק ההידראולי, הנצילות הכוללת והצריכה הסגולית, ונאשר שהמתקן עומד בסף.

$$U = 400 \text{ V} \quad I = 31.0 \text{ A} \quad \cos \varphi = 0.86 \quad Q = 72.0 \text{ m}^3/\text{h} \quad H = 58.0 \text{ m} \quad (\text{בוסטר משטחי, סף } 65\%)$$

1 הספק חשמלי נכנס (תלת-פאזי):

$$P_1 = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \cos \varphi / 1000 = \sqrt{3} \cdot 400 \cdot 31.0 \cdot 0.86 / 1000 = 18.47 \text{ kW}$$

2 הספק הידראולי מועיל:

$$P_h = Q \cdot H / 367 = 72.0 \cdot 58.0 / 367 = 11.38 \text{ kW}$$

3 נצילות כוללת (wire-to-water):

$$\eta_{\text{total}} = P_h / P_1 \cdot 100 = 11.38 / 18.47 \cdot 100 = 61.6\%$$

4 צריכה סגולית: $SEC = P_1 / Q = 18.47 / 72.0 = 0.257 \text{ kWh/m}^3$

תוצאה: **$\eta_{\text{total}} = 61.6\%$** , מתחת לסף 65% לבוסטר משטחי. מתקן חדש שכבר נכנס מתחת לסף הוא דגל אדום: בדרך כלל זו **בעיית התקנה**, לא בעיית משאבה. החשודים: מסנן יניקה סתום, אוויר כלוא ממעבר קונצנטרי, או נקודת עבודה רחוקה מ-BEP בגלל מגוף סניקה שנוק יתר על המידה.

הלך התפעולי: מדידת בסיס איננה רק תיעוד, היא בדיקת קבלה. אם המתקן עובר את הסף, שמרו את כל הערכים (זרם, לחצים, רעידות, טמפרטורת מסב) כ"טביעת אצבע" שמולה ישוו כל מדידה עתידית. אם הוא נכשל, מצאו את שורש ההתקנה *עכשיו*, כשהכול עוד פתוח ונגיש, ולא בעוד שנה כשתחזור כתלונה. ה-SEC של 0.257 kWh/m^3 והערכים האחרים הופכים לקו ההשוואה של פרק 24.

למה מדידת הבסיס שווה זהב

בלי מדידת בסיס בהרצה, אין לך מול מה להשוות בעוד שנתיים. כשהלקוח יתלונן ש"המשאבה חלשה", לא תדע אם היא ירדה או שכך נולדה. מדידת בסיס בריאה היא קו האפס של כל ניטור מצב: רעידות, נצילות, צריכה סגולית, טמפרטורת מסב. כל סטייה עתידית נמדדת ממנה. זה החיבור הישיר לפרק 24, שבו טביעת האצבע הזו הופכת לכלי אבחון.

קישורים בספר

מסת היסוד והקשר למשקל המכונה נדונים גם בפרק 6 (צירים, מסבים, מצמדים ותושבות), שם מפורט גם היישור והשפעת ההתפשטות התרמית. תכן הבור הרטוב והתצורות האנכיות בפרק 12. חישוב NPSH ושולי הביטחון שצנרת היניקה משפיעה עליהם בפרק 15. סדר האל-חוזר והגנת הקו מפני מכת מים בפרק 22. מדידת הבסיס וניטור המצב שהיא מזינה בפרק 24. בדיקת הנצילות המלאה שמדידת הבסיס היא הגרסה המקוצרת שלה בפרק 25.

אז מה? ההתקנה קובעת את אורך החיים, והיא בידיים שלך לגמרי. יסוד מסיבי פי שלושה עד חמישה מהמכונה, מילוי שמבטל חללים, יישור לייזר בתנאי עבודה אחרי תיקון רגל רכה, צנרת יניקה עם מעבר אקסצנטרי וצד שטוח למעלה וקטע ישר לפני האוגן, תמיכות עצמאיות שלא מעמיסות על המשאבה, אל-חוזר לפני מגוף בצד הסניקה, ובריכה מתוכננת נגד מערבולות. ואז רשימת תיוג להרצה שלא מדלגת, ובעיקר מדידת בסיס שתשמש קו ייחוס לכל החיים. משאבה שהותקנה נכון תעבוד שנים בשקט. משאבה שהותקנה בשלוק תחזור אליך כתלונה תוך חודשים, ותאשים את הברזל במקום את היד שהרכיבה אותו.

24 תפעול, אחזקה וניטור מצב

Operation, Maintenance & Condition Monitoring

בקצרה

משאבה לא מודיעה מראש שהיא חולה. היא פשוט עובדת, חודש אחר חודש, עד שבוקר אחד היא נעצרת. **ניטור מצב** הוא מה שהופך את ההפתעה הזו לתחזית: מדידה קבועה של ספיקה, לחץ, הספק, טמפרטורה ובעיקר **רעידות**, והשוואה למדידת בסיס. שינוי הדרגתי בכל אחד מהם הוא אזהרה מוקדמת, לעיתים חודשים לפני הכשל.

הרעידות הן הסימן החיוני ביותר, ולכן רוב הפרק עוסק בהן. מודדים מהירות רעידה **RMS במ"מ לשנייה**, משווים לאזורי תקן **ISO 10816 / 20816** A-מ (בריא) עד D (סכנת נזק), וקוראים את **הספקטרום** כדי לדעת לא רק כמה חמור אלא גם כמה. בסוף נחבר את הכול לעיקרון המנחה של אחזקה חזיה: **הגיל ושעות העבודה קובעים מתי לבדוק, המדידה קובעת מתי לשפץ**.

אחזקה שוטפת: מה עושים ומה רושמים

לפני שמדברים על חיישנים וספקטרום, יש שכבה בסיסית של אחזקה שמונעת את רוב הכשלים בכלל. רובה לא דורשת שום מכשיר, רק סדר ומשמעת.

אחזקה שוטפת של משאבה צנטריפוגלית נשענת על שלושה רכיבים מכניים שמתבלים: **המסבים, האטם והמצמד**. כל אחד מהם מתוכנן לחיים ארוכים, אבל רק בתנאי שמתחזקים אותו נכון. שאר העבודה היא תיעוד: רישום קבוע של מספר מדדים פשוטים, כדי שתהיה לך נקודת ייחוס כשמשהו משתנה.

סיכת מסבים: לוח זמנים, לא תחושה

המסבים (פרק 6) הם הרכיב המתכלה מספר אחד במשאבה מסתובבת, ושתי הסיבות העיקריות לכשל מסב הן דווקא **סיכת חסר וסיכת יתר**, לא בלאי טבעי. מסב מגרזים במרווחים קבועים, לפי שעות עבודה ולא לפי "מתי שזכרנו". מסב גלילים בגריז דורש חידוש כל עד 2,000 שעות בקירוב, תלוי בטמפרטורה ובמהירות. מסב טבול בשמן דורש בדיקת מפלס שבועית והחלפת שמן לפי שעות עבודה (או אחת לשנה לפחות).

סיכת יתר הורגת מסבים לא פחות מסיכת חסר

טעות נפוצה היא לדחוס גריז "כדי להיות בטוח". תא מסב מלא מדי לא מאפשר לגלילים לדחוף את הגריז העודף החוצה, הגריז נלוש, מתחמם ומאבד את תכונות הסיכה, וה**טמפרטורה קופצת**. הכלל המעשי: מלא כ-עד 1/2 1/3 מנפח התא, לא יותר, והוסף כמות קטנה במרווחים קבועים במקום הרבה בבת אחת. עליית טמפרטורת מסב מיד אחרי סיכה היא כמעט תמיד סימן לסיכת יתר, לא לסיכת חסר.

בדיקת אטם: לדעת מה נורמלי

סוג האטם (פרק 7) קובע מה מותר לראות. **אטם מכני** אמור לטפסף כמעט כלום, ולכן כל נזילה גלויה ממנו היא תקלה שמחייבת בדיקה. **אטם תקיעה** (gland packing), לעומת זאת, חייב לטפסף מעט, כמה טיפות לדקה, כי אותו טפסוף הוא מה שמקרר ומשמן את הצמה. אטם תקיעה שיבש לגמרי עומד להישרק. ההבחנה הזו קריטית: עובד שמהדק אטם תקיעה עד יובש מתוך כוונה טובה גורם נזק.

מה לרשום ביומן התחנה

תיעוד הוא הבסיס לכל ניטור מצב. בלי רישום בסיס אין מול מה להשוות, וכל מדידה עומדת בודדה וחסרת משמעות. הטבלה הבאה היא מינימום הרישום למשאבה במתקן שאיבה רציני.

טבלה 24.1 • יומן אחזקה ותפעול, מינימום רישום (כלי עזר)

מדד	תדירות	מה מחפשים
שעות עבודה (מונה)	חודשי	בסיס לתזמון סיכה, בדיקה ושיפוץ
לחץ יניקה ולחץ סניקה	שבועי / יומי	ירידת לחץ = שחיקה או סתימה
זרם (אמפר) ומתח (וולט)	שבועי	עלייה = עומס מכני, ירידה = ספיקה אבודה
טמפרטורת מסבים	שבועי	עלייה = סיכה לקויה או בלאי מתחיל
טמפרטורת מנוע / כריכות	שבועי	עומס יתר, אוורור חסום, מתח לא מאוזן
נזילה מהאטם	שבועי	מכני = יבש, תקיעה = טפסוף קל
רעידות (RMS mm/s)	חודשי / רבעוני	הסימן החיוני, מגמה מול ISO
בדיקת נצילות מלאה	לפי שעות / רגולציה	η כולל מול הסף (פרק 25)

הכלל החשוב ביותר ברישום

מדידה בודדת כמעט חסרת ערך. מה שמספק תובנה הוא **המגמה**: זרם שעולה לאט לאורך חצי שנה, לחץ סניקה שנשחק בהדרגה, מסב שמתחמם מחודש לחודש. לכן רשום תמיד גם את **נקודת העבודה** שבה נמדד הערך (ספיקה ולחץ), אחרת אתה משווה תפוחים לתפוזים. רעידה גבוהה יותר בספיקה אחרת היא אולי לא בלאי אלא רק עבודה רחוק מנקודת העבודה המיטבית.

פרמטרי ניטור מצב: ארבעה גדלים שמספרים את הסיפור

הקפיצה מאחזקה שוטפת ל**ניטור מצב** (condition monitoring) היא מעבר ממעקב עיני למעקב כמותי, מתועד ומשווה. ארבע משפחות של גדלים נמדדות, וכל אחת חושפת סוג אחר של בעיה. היופי הוא שביחד הן **מאשרות זו את זו**: כשהזרם עולה, הלחץ יורד והרעידות מטפסות יחד, התמונה ברורה.

mm/s

רעידות · הסימן החיוני

T°

טמפרטורה · מסבים ומנוע

P·Iהספק זרם · עלייה =
עומס מכני**Q·H**ספיקה ועומד · ירידה =
שחיקה פנימית

ספיקה, עומד ולחץ

זוג הספיקה והעומד הוא ה"דופק" ההידראולי של המשאבה. ירידה הדרגתית בעומד בספיקה נתונה מצביעה כמעט תמיד על **בלאי פנימי**: טבעות שחיקה שנפתחו (פרק 5), מאיץ שנשחק או נזילה פנימית שגדלה. ירידה פתאומית מצביעה על סתימה, אוויר נלכד או ברז שנסגר חלקית. מספיק שני מדי לחץ, אחד ביניקה ואחד בסניקה, וההפרש ביניהם בתוספת תיקון גובה הוא העומד.

הספק זרם

הזרם בלוח הוא המדד הזול והזמין ביותר, וכדאי לרשום אותו שבועית. **עלייה** בזרם בנקודת עבודה קבועה מסמנת התנגדות מכנית: מסב שנתפס, יישור שהשתבש, חיכוך שגדל. **ירידה** בזרם דווקא מדאיגה אחרת, היא לרוב אומרת שהמשאבה מזיזה פחות מים, כי איבדה ספיקה בבלאי. חשוב לזכור שזרם תלוי גם בנקודת העבודה ובמתח הרשת, ולכן השוואה הוגנת דורשת אותם תנאים.

טמפרטורה: מסבים ומנוע

טמפרטורת המסבים היא אינדיקטור מוקדם ורגיש. מסב בריא רץ בכמה עשרות מעלות מעל הסביבה ולא יותר. **עלייה מתמשכת** בטמפרטורת מסב, גם אם עדיין ב"טווח", היא דגל אדום: סיכה שמתדרדרת, בלאי שמתחיל או יישור לקוי. טמפרטורת המנוע וכריכותיו מספרת על העומס החשמלי: מנוע חם מדי סובל מעומס יתר, מאוורור חסום או ממתח לא מאוזן בין הפאזות. מדידה נקודתית במצלמה תרמית פעם ברבעון מגלה הרבה בשניות.

רעידות: הסימן החיוני

הרעידות הן הגדול הכי עשיר במידע מבין כל פרמטרי הניטור. בניגוד לטמפרטורה או לזרם, שנותנים מספר אחד, הרעידה נושאת בתוכה **חתימה ספקטרלית** שמצביעה ישירות על המקור: אי-איזון, אי-יישור, רפיון, בלאי מסבים, בעיה הידראולית או חשמלית. לכן רוב שאר הפרק מוקדש להן.

רעידות לפי ISO 10816 / 20816

כדי שמדידת רעידות תהיה שימושית, צריך שלושה דברים: **מה** מודדים (איזה גודל פיזיקלי), **איפה** מודדים (באיזו נקודה ובאיזה כיוון), ו**מול מה** משווים (איזה תקן ואיזה ערך גבול). נתחיל בגודל הנמדד.

למה מהירות רעידה, ולמה RMS

רעידה אפשר לתאר בשלושה גדלים: **תזוזה** (mm), **מהירות** (mm/s) ו**תאוצה** (m/s² או g). שלושתם קשורים, אבל לכל אחד יש תחום תדרים שבו הוא הכי רגיש. עבור מכונות מסתובבות

בתחום התדרים הרגיל של משאבה, כ-10 עד 1,000 Hz, מהירות הרעידה היא המדד שמתאם הכי טוב לחומרת הנזק. לכן התקנים בנו את אזורי ההערכה שלהם סביב מהירות.

הערך המדווח הוא **ערך אפקטיבי** (*RMS, root-mean-square*) של מהירות הרעידה. ה-RMS הוא "ממוצע האנרגטי" של אות הרעידה, ולכן הוא יציב ומייצג טוב יותר מאשר ערך שיא רגעי. כלל ההמרה לאות סינוסואידלי טהור: $peak = \sqrt{2} \cdot RMS \approx 1.414 \cdot RMS$. כל אזורי ה-ISO שבפרק הזה מנוסחים ב-RMS, וזה מה שצריך לרשום ביומן.

מהירות רעידה אפקטיבית · *RMS velocity (mm/s)*

המדד התקני לחומרת רעידה במכונות מסתובבות. רחב-פס, כלומר משקלל את כל התדרים יחד למספר אחד. זה הערך שמסווג לאזור A עד D.

ISO 10816 / ISO 20816

משפחת תקנים להערכת רעידות מכונה ממדידה על **חלקים לא-מסתובבים** (בתי מסב, גוף). 20816 הוא הדור החדש שמחליף את 10816 ומיושר אליו. החלק הרלוונטי למשאבות רוטודינמיות הוא (part 7) חלק 7.

קטגוריה II · *Category II*

משאבות ליישום כללי ופחות קריטי (נוזלים לא מסוכנים); זו ברירת המחדל לרוב משאבות המים. משאבות אנכיות נכללות במפורש בתחולת התקן (מעל 1 kW; המדידה בבית המסב של המשאבה או במסב התחתון של המנוע), ומתחת ל-600 סל"ד נדרשת בנוסף מדידת תזוזה שיא-לשיא. משאבות טבולות, משאבות בוצה ומשאבות דחיקה חיובית מוחרגות מהתקן.

ארבעת אזורי ההערכה: A · B · C · D

הרעיון המרכזי של התקן פשוט ויפה: כל ערך רעידה נופל לאחד מארבעה אזורי הערכה (evaluation zones). האזורים מתארים מצב, לא רק מספר.

A חדש או לאחר שיפוץ

רמת הרעידות של מכונה שזה עתה הורצה. זה היעד אחרי כל שיפוץ או התקנה. המשך מעקב רגיל.

B קביל להפעלה רציפה ללא הגבלת זמן

מכונה במצב תקין שיכולה לעבוד כך לאורך כל חייה. אין צורך בפעולה, רק מעקב המשך.

C זהירות, תכנן אחזקה

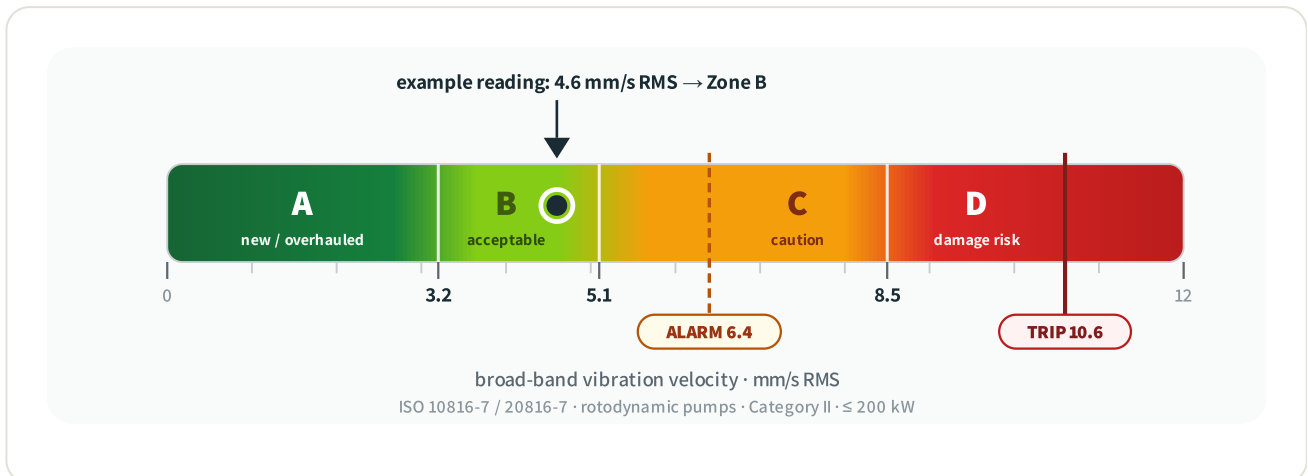
לא משביע רצון לטווח ארוך. אפשר להמשיך לתקופה מוגבלת, אך יש לתכנן טיפול בהזדמנות הקרובה: יישור, איזון, מסבים, הידוק.

D לא קביל, סכנת נזק

חומרה שעלולה לגרום נזק למכונה. יש לתאם השבתה מבוקרת לטיפול בהקדם, תוך שמירה על רציפות התחנה דרך יחידות גיבוי.

בנוסף לגבולות האזורים, התקן מגדיר שני ספים תפעוליים: **סף אזעקה (ALARM)**, שבו צריך לחקור ולתכנן פעולה, ו**סף השבתה (TRIP)**, שבו יש לעצור את המכונה כדי למנוע נזק. עבור

משאבות מים אופייניות (קטגוריה II, עד 200 kW), הערכים הם 6.4 mm/s ALARM ו- TRIP 10.6 mm/s .



איור 24.1 · סרגל אזורי הרעידות לפי ISO 10816-7 / 20816-7, קטגוריה II, משאבות עד 200 kW, בסקלה לינארית של mm/s RMS. הצבע מקודד את החומרה: ירוק כהה (A, חדש או לאחר שיפוץ) ← ירוק בהיר (B, קביל לעבודה ממושכת) ← ענבר (C, זהירות, תכנן אחזקה) ← אדום (D, לא קביל, סכנת נזק). הדגלון הכתום הוא סף האזהרה (ALARM 6.4) והאדום סף ההשבתה (TRIP 10.6). המחוג השחור מדגים קריאה של 4.6 mm/s שנופלת באזור B.

ערכי גבול מתוך ISO 10816-7:2009 טבלה A.1 · קנה מידה לינארי mm/s RMS

טבלה 24.2 · גבולות אזורי רעידות לפי ISO 10816-7 / 20816-7, מהירות RMS [mm/s]

גבול	קטגוריה I, $\leq 200 \text{ kW}$	קטגוריה I, $> 200 \text{ kW}$	קטגוריה II, $\leq 200 \text{ kW}$	קטגוריה II, $> 200 \text{ kW}$
A / B (קצה אזור A)	2.5	3.5	3.2	4.2
B / C (קצה אזור B)	4.0	5.0	5.1	6.1
C / D (קצה אזור C)	6.6	7.6	8.5	9.5
סף אזהרה (ALARM)	5.0	6.3	6.4	7.6
סף ההשבתה (TRIP)	8.3	9.5	10.6	11.9

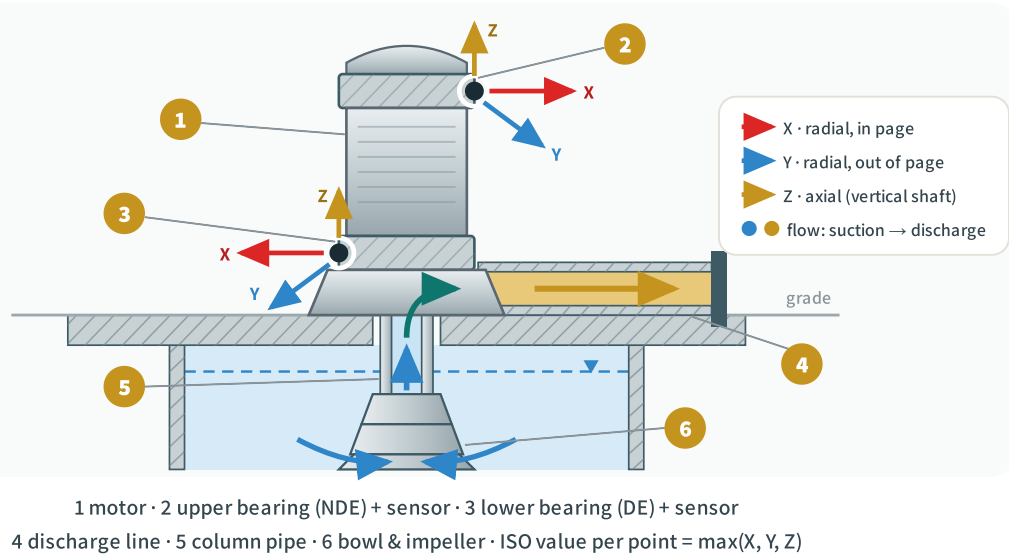
איך בוחרים קטגוריה ועמודה

שתי שאלות קובעות את העמודה הנכונה. **קטגוריה**: רוב משאבות המים והשפכים הן II (יישום כללי, נוזל לא מסוכן). קטגוריה I שמורה ליישומים קריטיים יותר עם דרישות אמינות גבוהות. **הספק**: מעל 200 kW הגבולות מתרופפים מעט, כי מכונות גדולות רועדות מעט יותר באופן טבעי. ברירת המחדל לרוב המשאבות בשטח, וזו גם ברירת המחדל המקובלת בדוחות רעידות למשאבות מים, היא **קטגוריה II עד 200 kW**: A עד 3.2, B עד 5.1, C עד 8.5, אזהרה 6.4, השבתה 10.6.

איפה מודדים: שתי נקודות מסב, שלושה כיוונים

ערך רעידה בלי לדעת איפה הוא נמדד הוא חסר משמעות. הכלל הוא למדוד על כל בית מסב בנפרד, בשלושה כיוונים מאונכים זה לזה. במשאבה אנכית טבולה, שכיחה מאוד בקידוחי מים ובתחנות הרמה, מדברים על מסב עליון (NDE, non-drive end) ומסב תחתון (DE, drive end). שלושת הכיוונים: שני כיווני רדיאלי ניצבים זה לזה (במכונה אופקית: אופקי ואנכי; במשאבה אנכית: שניהם אופקיים) וכיוון צירי לאורך הציר.

הכיוון אינו רק פורמליות, הוא חלק מהאבחון. רעידה רדיאלית דומיננטית מצביעה לרוב על אי-איזון או רפיון, ואילו רעידה צירית חזקה מצביעה לרוב על אי-יישור או בעיית מצמד. הערך שמסווג לאזור ISO בכל נקודה הוא הגבוה מבין שלושת הכיוונים, וכך נהוג לחשב בדוח רעידות מקצועי: ערך ה-ISO של נקודה = $\max(X, Y, Z)$ של ה-RMS.



איור 24.2: נקודות המדידה במשאבה אנכית: בית המסב העליון (NDE, נקודה 2) ובית המסב התחתון (DE, נקודה 3), ובכל נקודה שלושה כיוונים ניצבים. במשאבה אנכית הציר עומד, ולכן הכיוון הצירי (Z, זהב) הוא אנכי לאורך הציר, ושני הרדיאליים אופקיים וניצבים זה לזה: X (אדום) במישור הציר ו-Y (כחול) בניצב לו. ערך ה-ISO של כל נקודה הוא הגבוה מבין שלושה: $\max(X, Y, Z)$. החצים בתוך הצנרת מקודדים את הזרימה: כחול = יניקה בלחץ נמוך, זהב = סניקה בלחץ גבוה.

סכמטי · משאבת טורבינה אנכית בבור רטוב, לא בקנה מידה

ניתוח ספקטרום (FFT): מ"כמה חמור" ל"מה הסיבה"

אזורי ה-ISO מספרים כמה חמור. הם מודדים את כל הרעידה יחד, רחב-פס, ונותנים מספר אחד. אבל מספר אחד לא אומר לך למה המשאבה רועדת, ולכן לא אומר לך מה לתקן. כאן נכנס הניתוח ספקטראלי (FFT, Fast Fourier Transform): פירוק אות הרעידה לתדרים המרכיבים אותו, כדי לראות איזה מגננון פיזי "מגנן" הכי חזק.

המפתח לקריאת ספקטרום משאבה הוא תדר הסיבוב (running frequency, f_1), פשוט מהירות הסיבוב חלקי 60. ממנו נגזרת כל שאר התמונה.

$$f_1 = \text{rpm} / 60 \quad | \quad \text{BPF} = z_i \cdot f_1$$

f_1	תדר הסיבוב היסודי [Hz]. לדוגמה, משאבה ב-1475 rpm נותנת $f_1 \approx 24.6 \text{ Hz}$.
z_i	מספר להבי המאיץ.
BPF	תדר מעבר הלהבים (blade/vane-pass frequency). הרכיב ההידראולי המובהק. לדוגמה, 6 להבים ב-24.6 Hz נותנים $\text{BPF} \approx 148 \text{ Hz}$.

עכשיו אפשר לקרוא את הספקטרום כמו מפה. כל "פסגה" בתדר מסוים מצביעה על מנגנון אחר. הטבלה הבאה היא מפתח האבחון המרכזי של הפרק.

טבלה 24.3 • מפתח אבחון FFT: מתדר לתקלה

חתימה ספקטרלית	סיבה סבירה	הערות וכיוון מדידה
$f_1 \times 1$ דומיננטי	אי-איזון (unbalance) של הרוטור / המאיץ	רדיאלי. גדל עם הצטברות מוצקים על המאיץ
$f_1 \times 2$ דומיננטי	אי-יישור (misalignment) או רפיון	לרוב עם רכיב צירי. מצמד / יישור
סולם הרמוניות $\times 1, \times 2, \times 3, \dots$	רפיון מכני (looseness)	ברגי בסיס רופפים, התאמות שחוקות, בסיס סדוק
$f_1 \times z_i$ (מעבר להבים, BPF)	הידראולי	מרווח מאיץ-לשון, רה-סירקולציה, עבודה רחוק מ-BEP
$0.3-0.5 f_1$ (תת-סינכרוני)	רה-סירקולציה / אי-יציבות הידראולית	רעש רחב-פס בתדרים גבוהים מסמן קוויטציה (פרק 15); רחב-פס תת-סינכרוני מצביע על רה-סירקולציה או אי-יציבות
$2 \times$ תדר הרשת (100 Hz @ 50 Hz)	חשמלי (מנוע)	אקסצנטריות מרווח אוויר, בעיות סטטור; מוט רוטור שבור מופיע דווקא כפסי-צד סביב $1 \times$ בתדר מעבר הקטבים. בדוק שנעלם בכיבוי
תדרים גבוהים לא-סינכרוניים	בלאי מסבים (גלילים)	BPFO/BPFI/BSF/FTF. עולה בניתוח מעטפת / תדר גבוה
פסגה רחבה סביב תדר קבוע	תהודה מבנית (resonance)	בלתי תלוי בשינוי מהירות. אשר במבחן הקשה / האטה

משמעת קריאה: ה-FFT לעולם לא משנה את האזור

זו נקודה קריטית שקל לטעות בה. סיווג חומרת הרעידה לאזור A עד D נעשה **אך ורק לפי הערך הרחב-פס (RMS)**, לעולם לא לפי גובה פסגה בודדת בספקטרום. ה-FFT עונה רק על "למה", לא על "כמה חמור". מכונה יכולה להראות פסגת $1 \times$ בולטת בספקטרום ועדיין להיות באזור B, ולהפך. אל תקפיץ אזור בגלל פסגה מרשימה, ואל תרגיע בגלל ספקטרום "נקי" אם ה-RMS גבוה. שני המספרים מספרים שני סיפורים משלימים.

חתימה אחידה בכל היחידות = סיבה מערכתית

כשכל היחידות הזהות בתחנה מציגות את אותה חתימה ספקטרלית ואת אותה רמת רעידה, חשוד תחילה בסיבה מערכתית משותפת לפני שאתה מאבחן כל משאבה בנפרד: תהודה של קו הסניקה המשותף, מצב הידראולי משותף או בעיית יסוד. דוגמה קלאסית היא קו סניקה אנכי גבוה בתחנת שאיבה, שמתנהג כקורה ארוכה עם תדר עצמי נמוך שנופל בדיוק בתחום העירור של המשאבות. לעומת זאת, יחידה אחת חורגת בתוך צי אחד מצביעה דווקא על תקלה פרטנית של אותה יחידה.

אחזקה חזויה: השעות קובעות מתי לבדוק, המדידה מתי לשפץ

הגישה הישנה היא אחזקה מתקנת (reactive): לתקן כשנשבר. הגישה הבאה היא אחזקה מונעת (preventive): לתחזק לפי לוח זמנים קבוע. אבל הגישה החזקה באמת היא אחזקה חזויה (predictive): להחליט מתי לפעול לפי המצב הנמדד בפועל, לא לפי השעון ולא לפי הלוח.

מה ניסיון השדה מלמד על קצב הירידה בנצילות

ניתוח של למעלה מ-150 בדיקות נצילות מתועדות, לאורך שנים ומול מתקנים מגוונים, חושף שתי מסקנות מעשיות חזקות שמעצבות את כל אסטרטגיית האחזקה:

מדודה η

המדד היחיד שקובע מתי לשפץ

$$R^2 \approx 0.04$$

הגיל לבדו מנבא כמעט כלום

~3.9%

ירידה במקרים הגרועים, לשנה

~1.9%

ירידת נצילות טבעית, חציון לשנה

הממצא הראשון: הירידה הטבעית בנצילות נמדדה בחציון של כ-1.9% לשנה, ובמקרים הגרועים עד כ-3.9% לשנה. זה פי שניים עד פי שלושה מהירידה ה"ספרותית" שמערכות רבות מניחות כברירת מחדל (כ-0.8% לשנה). כלומר, משאבות בשדה מתבלות מהר יותר ממה שמודלים אופטימיים מניחים, וזו הסיבה שכל כך הרבה מתקנים מופתעים למצוא את עצמם מתחת לסף.

הממצא השני, החשוב עוד יותר: הגיל ושעות העבודה לבדם מנבאים רק חלק קטן מאוד מירידת הנצילות. במונחים סטטיסטיים, הגיל לבדו מסביר בערך 4% מהשונות בנצילות ($R^2 \approx 0.04$). המשמעות ישירה: אי אפשר לקבוע מתי לשפץ משאבה לפי "כל X שנים". שתי משאבות באותו גיל ואותן שעות יכולות להיות במצבים שונים לחלוטין, תלוי באיכות המים, בקוויטציה, באיכות ההתקנה ובמזל.

העיקרון המנחה של אחזקה חזויה

מכאן נגזרת מסגרת ההחלטה הפשוטה והחזקה של כל הפרק:

- **הגיל ושעות העבודה קובעים מתי לְבדוק.** הם טריגר טוב לתזמון בדיקת נצילות (וגם הדרישה הרגולטורית בנויה כך, פרק 25).
 - **המדידה קובעת מתי לְשפץ.** רק נצילות נמדדת בפועל, ומגמת הירידה שלה, מצדיקות החלטת שיפוץ או החלפה. לא לוח שנה, לא הרגשה.
- בקצרה: הגיל שולח אותך למדוד, המדידה מחליטה אם לפעול. כל החלטת CAPEX על שיפוץ או החלפה צריכה להישען על מספר נמדד, לא על הנחה.

איך מחברים את הכול לתוכנית אחת

שלוש שכבות ההחלטה משתלבות למשטר אחזקה קוהרנטי. כל שכבה נשענת על נתון שכבר אוספים בלאו הכי במסגרת הניטור.

1 תזמון בדיקה לפי שעות וגיל

שעות העבודה והגיל קובעים מתי להזמין בדיקת נצילות מלאה ומדידת רעידות. זה גם מה שהרגולציה מחייבת (פרק 25).

2 החלטת שיפוץ לפי נצילות נמדדת ומגמה

אם הנצילות הנמדדת ירדה מתחת לסף, או אם מגמת הירידה תלולה (מעל כ-2.5% לשנה), שוקלים שיפוץ. טבעות שחיקה (פרק 5) הן החשוד הזול הראשון.

3 החלטת CAPEX לפי כדאיות כלכלית

בין שיפוץ להחלפה מכריעים לפי ערך נוכחי נקי: עלות האנרגיה האבודה לאורך השנים מול עלות ההשקעה. משאבה גדולה מצדיקה התערבות מוקדמת יותר.

משאבת בור נבדקה שלוש פעמים לאורך השנים. הסף הרגולטורי למשאבת בור הוא 55%.
ננתח את המגמה ונחליט.

$$\text{(לאחר שיפוץ)} \quad 2021: \eta_{\text{total}} = 68\% \quad 2024: \eta_{\text{total}} = 61\% \quad 2026: \eta_{\text{total}} = 56\%$$

(משאבת בור) סף = 55%

1 קצב הירידה בתקופה הראשונה: $(68 - 61) / 3 \text{ yr} = 2.33 \%/\text{yr}$

2 קצב הירידה בתקופה השנייה, מואץ: $(61 - 56) / 2 \text{ yr} = 2.50 \%/\text{yr}$

3 חיזוי לשנה הבאה לפי הקצב הנוכחי: מתחת לסף $56 - 2.5 \approx 53.5\% \rightarrow$

החלטה: לשפץ עכשיו. הנצילות 56% כבר על הגבול, המגמה מאיצה (2.5%/yr, על הסף המעשי), והחיזוי חוצה את הסף הרגולטורי בתוך שנה. **שים לב: ההחלטה נשענה על המגמה הנמדדת, לא על גיל המשאבה.**

הצעד הראשון בשיפוץ אינו בהכרח החלפה. ירידה הדרגתית בלי קוויטציה ובלי תקלת מנוע מצביעה לרוב על **טבעות שחיקה** שנפתחו (פרק 5). החלפת זוג טבעות עולה שבריר ממחיר מאיץ חדש ולעיתים קרובות מחזירה את הנצילות אל מעל הסף. רק אם זה לא מספיק עוברים לשיפוץ מלא או החלפה.

קישורים בספר

סיכת המסבים ולוח הזמנים שלה הם לב פרק 6. בדיקות וטיפול באטמים, ההבחנה בין אטם מכני לאטם תקיעה, בפרק 7. רעידות בתדר גבוה כסימן לקוויטציה נדונו גם בפרק 15 (NPSH וקוויטציה). בלאי טבעות השחיקה והחזרת הנצילות בפרק 5. בדיקת הנצילות המלאה, החישוב, הספים והדיווח הרגולטורי, היא כל פרק 25.

אז מה? מדידה הופכת הפתעה לתחזית. אחזקה שוטפת נכונה, סיכה במידה ולא בכוח, אטם שמטפטף נכון, מונעת את רוב הכשלים עוד לפני שהתחילו. ניטור של ספיקה, לחץ, זרם, טמפרטורה ובעיקר רעידות, מול מדידת בסיס ומול אזורי ISO 10816/20816, חושף בעיה חודשים מראש ומצביע גם על מקורה דרך ה-FFT. וההחלטה היקרה באמת, מתי לשפץ או להחליף, נשענת על נצילות נמדדת ועל מגמתה, לא על גיל ולא על לוח שנה. השעות שולחות אותך למדוד, המדידה מחליטה אם לפעול. זו הדרך לתחנה שלא נעצרת בהפתעה.

25 בדיקות נצילות ותקנים

Efficiency Testing & Standards

בקצרה

"נראה לי שהמשאבה בסדר" זו לא הנדסה. **בדיקת נצילות** נותנת מספר אמיתי, מדיד וניתן לחזרה. תקן **ISO 9906** מגדיר איך מודדים ואיזו אי-ודאות מותרת, לפי שלוש **דרגות** דיוק. דרגה 2 היא הסטנדרט המעשי לבדיקות שדה ולרגולציה הישראלית.

הלב המעשי של הפרק הוא בדיקת **wire-to-water**: מודדים חשמל נכנס, ספיקה ועומד בנקודות אחדות, מחשבים נצילות כוללת ו-**SEC**, בונים את עקום המשאבה הנמדד, משווים אותו לעקום היצרן בתוך רצועת הסבולת, וקובעים אם המתקן עומד בסף הרגולטורי. **מה שלא נמדד, לא מנוהל**, ולא ניתן לתבוע עליו תקציב שיפוץ.

למה בכלל בודקים, ומה בודקים

משאבה לא נשברת ביום אחד. היא דועכת בשקט, אחוז נצילות אחר אחוז, עד שיום אחד החשבון החודשי גבוה ב-30 אחוז בלי שאיש שם לב מתי זה קרה. בדיקת נצילות היא הרגע שבו מחזירים את ההדרדרות השקטה הזו למספר.

בדיקת נצילות אינה ניסוי מעבדה. היא מדידה הנדסית של מתקן עובד, בשטח, בנקודת העבודה האמיתית שלו, שמטרתה לענות על שלוש שאלות: **כמה אנרגיה המשאבה מבזבזת היום, כמה היא ירדה מאז שהיתה חדשה, והאם היא עדיין עומדת בחוק**. שלוש התשובות יחד הן הבסיס לכל החלטה כלכלית בהמשך, מהחלפת טבעות שחיקה ועד החלפת משאבה שלמה (פרק 27).

שלושה גדלים נמדדים בשטח, וכל היתר מחושב מהם. אלה **הספק חשמלי נכנס** (P_1), **ספיקה** (Q) ו**עומד** (H). מתוכם מגיעים אל הנצילות הכוללת (*total / wire-to-water efficiency*) ואל ה**צריכה הסגולית** (*specific energy consumption, SEC*), שני המספרים שמספרים את כל הסיפור.

התקן הבינלאומי לבדיקות קבלה של משאבות רוטודינמיות. גרסת 2012 מגדירה שלוש דרגות דיוק (1, 2, 3) ואת רצועות הסבולת לכל אחת. הוא קובע גם כמה נקודות מדידה דרושות וכיצד לחשב את הגדלים.

· **נצילות כוללת** η_{total} (wire-to-water)

היחס בין ההספק ההידראולי המועיל שיוצא מהמשאבה לבין ההספק החשמלי שנכנס בלוח. כולל את כל החוליות: משאבה, מנוע, ממיר תדר. זה המספר שהרגולטור והחשבון החשמלי "רואים".

· **צריכה סגולית** SEC (kWh/m^3)

כמה קילוואט-שעה נדרשים כדי להזיז קוב מים אחד. המדד היחיד שמשווה משאבות שונות בלי קשר לגודלן, ושמתרגם ישירות לאגורות לקוב.

דרגות וסבולות לפי ISO 9906

לכל מדידה יש אי-ודאות. מד ספיקה אולטרסוני טוב טועה בכ-1.5–2%, מד לחץ בכ-0.5–1%, מנתח הספק בכ-1%. התקן לא מתעלם מאי-הוודאות הזו, הוא מתקצב אותה: הוא מגדיר מראש כמה סטייה מותרת בין הנמדד למובטח, לפי **דרגת** הבדיקה. ככל שהדרגה מחמירה יותר, כך נדרשים מכשירים מדויקים יותר ורצועות הסבולת צרה יותר.

דרגה 1 (Grade 1) · מעבדה ומשאבות קריטיות

1

הדרגה המחמירה. בדיקת קבלה במפעל היצרן, מכשור מלא ומכיל. רצועות צרות, אי-ודאות מינימלית. לא מעשית לרוב בדיקות השדה.

דרגה 2 (Grade 2) · הסטנדרט המעשי

2

הדרגה של בדיקות שדה ושל הרגולציה הישראלית. ניתנת להשגה עם מכשור שדה איכותי (מד ספיקה אולטרסוני, מדי לחץ מכילים, מנתח הספק תלת-פאזי). זו ברירת המחדל לכל הפרק.

דרגה 3 (Grade 3) · מים בכמות, פחות קריטי

3

הדרגה המקלה. רצועות רחבות מאוד, מתאימה למתקנים שבהם נדרשת רק הערכה גסה. אינה מספקת לדיווח רגולטורי.

הטבלה הבאה היא כלי העבודה המרכזי של כל בודק נצילות. היא מרכזת את רצועות הסבולת של שלוש הדרגות זו לצד זו. שימו לב שסבולת הנצילות תמיד **חד-כיוונית**: הנצילות הנמדדת מותר שתהיה נמוכה מהמובטחת רק עד גבול מסוים, כי לקוח לא אמור לקבל משאבה גרועה מהמובטח. שאר הגדלים דו-כיווניים.

טבלה 25.1 • רצועות עבודה פנימיות לאבחון השוואתי, ברוח דרגות ISO 9906 (כלי עזר; ערכי התקן המלאים בתיבה למטה)

גודל נמדד	דרגה 1	דרגה 2	דרגה 3	הערה
ספיקה Q	±1.5%	±2.5%	±3.5%	סטייה דו-כיוונית
עומד H	±1.5%	±3.0%	±5.0%	סטייה דו-כיוונית
הספק P	±1.5%	±4.0%	±5.5%	דו-כיוונית; מעל = רע
נצילות η	-2.5%	-4.5%	-5.5%	חד-כיוונית (רק כלפי מטה)

למה דרגה 2 היא הקו הישראלי

דרגה 1 דורשת מעבדה ומשאבה מפורקת, מה שאי-אפשר בשטח על משאבה מותקנת ועובדת. דרגה 3 רחבה מדי, רצועה כל-כך גדולה שכמעט כל מדידה "עוברת" ולכן היא חסרת ערך אבחנתי. **דרגה 2 היא נקודת האיזון:** צרה מספיק כדי להבחין בין משאבה בריאה לשחוקה, ורחבה מספיק כדי להיות מושגת עם מכשור שדה. משרד האנרגיה מקבל דרגה 2 כסטנדרט המינימלי כאשר הבדיקה מבוצעת על ידי מהנדס רשום ובמכשור בתוקף כיוול.

שתי משפחות מספרים, אל תערבב

בספרות מופיעות שתי קבוצות סבולת לדרגה 2. רצועות תקן ISO 9906:2012 לדרגה 2B רחבות יותר: 5%–η, 5%±H, 8%±Q, באחוזים יחסיים מהערך המובטח (הנצילות הנמדדת נדרשת להיות לפחות 95% מהמובטחת), לא בנקודות אחוז; בדרגה 3B: 7%–η, 7%±H, 9%±Q. רצועות אלה משמשות להכרעת קבלה/דחייה משפטית מול היצרן. הרצועות הצרות בטבלה 25.1 (4.5%– / 3%± / 2.5%±) הן רצועות עבודה פנימיות, קרובות לדרגה 1, ומשמשות **לציור רצועת הסבולת על הגרף** ולאבחון השוואתי. בדוח אחד, השתמש בעקביות באותה קבוצה, וציין במפורש באיזו.

בדיקת wire-to-water בשטה

בשדה אין מעבדה, אין מערכת בקרה תקנית, ולרוב אין אפילו מד ספיקה קבוע. הבדיקה המעשית מודדת את הנצילות הכוללת משלוש נקודות מדידה זמינות, בדיוק כפי שראינו בפרק 4. הצירוף "wire-to-water" מתאר את הגבולות: מהחוט, כלומר מהחשמל הנכנס בלוח, ועד המים, כלומר ההספק ההידראולי שיוצא בפועל. כל מה שביניהם, יעילות המנוע, יעילות הממיר, יעילות המשאבה, נספר יחד.

1 הספק חשמלי נכנס P_1

מנתח הספק תלת-פאזי בלוח מודד מתח, זרם ומקדם הספק: $P_1 [kW] = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \cos\varphi / 1000$. הקפד ש- $\cos\varphi$ עשורני (0.85) ולא אחוזים (85).

2 ספיקה Q

מד ספיקה אולטרסוני בהצמדה, או שיטת מילוי/ריקון מאגר בנפח ידוע מול שעון. $[m^3/h]$.

3 עומד H

לחץ סניקה פחות לחץ יניקה, בתוספת תיקון גובה מד הלחץ. במשאבת בור: מפלס דינמי (מד מפלס) ועוד לחץ ראש הקידוח. $[m]$.

4 חישוב נצילות ו-SEC

$$SEC = P_1/Q; \eta = P_h/P_1 \cdot 100; P_h = Q \cdot H/367$$

נוסחה 25.1 • נצילות כוללת ו-SEC

$$\eta_{total} = (Q \cdot H / 367) / P_1 \times 100 \quad | \quad SEC = P_1 / Q$$

P_1	הספק חשמלי נכנס $[kW]$: $\sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \cos\phi / 1000$ (תלת-פאזי).
Q	ספיקה $[m^3/h]$. שמור על $Q > 0$; אם הוא אפס, SEC ו- η אינם מוגדרים.
H	עומד כולל $[m]$ של עמוד מים בנקודת העבודה.
367	הקבוע שממיר $m^3/h \times m$ ל- kW . ראה תיבת ההסבר למטה.
SEC	צריכה סגולית $[kWh/m^3]$. תמיד 3 ספרות אחרי הנקודה.

מאפייה בא הקבוע 367

ההספק ההידראולי הוא $P_h = \rho \cdot g \cdot Q \cdot H$. כשמכניסים ספיקה ב- m^3/h במקום ב- m^3/s (חלוקה ב-3600), עומד במטרים, ורוצים תוצאה ב- kW (חלוקה ב-1000), כל הקבועים מתאחדים לאחד: $366.97 = (1000 \times 9.81) / (1000 \times 3600)$. $367 \approx$ עבור מים ($\rho \approx 1000 \text{ kg/m}^3$; ב- $20^\circ C$, עם $\rho = 998$, הקבוע המדויק הוא 367.7). הנוסחה $P_h = Q \cdot H/367$ היא קיצור הדרך שכל בודק נצילות בישראל מכיר בעל פה. היא חוזרת לאורך כל הספר, מפרק 4 ועד כאן. בתוכנות מקצועיות מופיע לעיתים גם הקבוע 367.1 (לפי $g = 9.80665$); ההבדל, כ-0.03%, זניח לכל צורך מעשי.

η_{total} , לא η_{pump} , מול הסף

הסף הרגולטורי של משרד האנרגיה נמדד בנצילות הכוללת (מהחשמל למים), ולא בנצילות המשאבה בלבד. כך נצילות מנוע נמוכה או הפסדי ממיר נספרים נגד המתקן, כפי שצריך, כי הלקוח משלם על הכול. לעולם אל תדווח נצילות משאבה (η_{pump}) במקום נצילות כוללת מול הסף, זו טעות שמטעה גם את הלקוח וגם את הרגולטור ועלולה "להעביר" משאבה שלמעשה נכשלת.

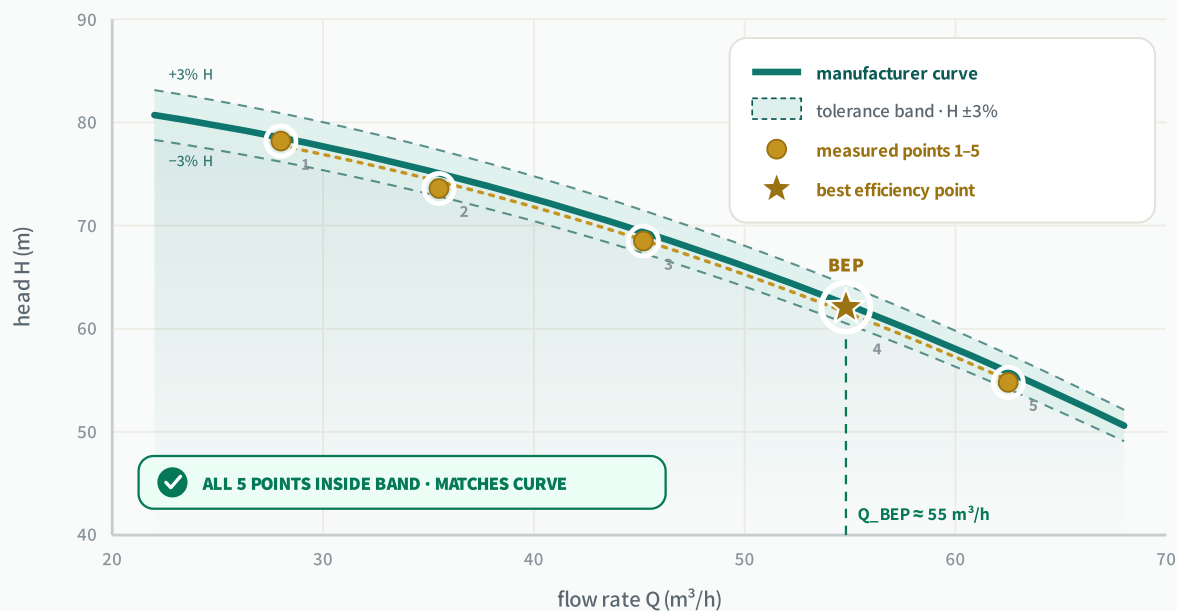
מנקודה אחת אל עקום שלם: הבדיקה הרב-נקודתית

מדידה אחת נותנת תמונה של רגע אחד. כדי להבין את המשאבה צריך עקום, ולכן תקן ISO 9906 דורש לפחות **חמש נקודות מדידה** בכל בדיקת ביצועים, בכל דרגה, פרוסות לאורך טווח העבודה, מספיקה נמוכה (סביב $0.5 \times Q_{\text{rated}}$) ועד ספיקה גבוהה (סביב $1.2-1.4 \times Q_{\text{rated}}$). מכל נקודה מחשבים Q , H , P , η , ומחברים את הנקודות לעקום נצילות מדוד מול ספיקה.

פסגת עקום הנצילות הזה היא **הנקודת הנצילות המיטבית** (*best efficiency point, BEP*). כשיש חמש נקודות או יותר, מתאימים אליהן פרבולה ($\eta = a \cdot Q^2 + b \cdot Q + c$) ומוצאים את הפסגה ב- $Q_{\text{BEP}} = -b/(2a)$, תוך הקפדה לא לחרוג מטווח הנקודות שנמדדו בפועל. עם פחות מחמש נקודות מסתפקים בנקודה בעלת הנצילות הגבוהה ביותר, ומסמנים את ה-BEP בדוח כ"מקורב".

מרווח הנקודות חשוב כמו מספרן

חמש נקודות צפופות בקצה אחד של העקום שוות כמעט שתי נקודות. התקן דורש ששתי נקודות יחבוקו את ספיקת הערובה: אחת בטווח שבין 5%-ל-0% ממנה ואחת בין 0%-ל-5%+, ושאר הנקודות ייפרסו על פני תחום העבודה המותר. כלל עבודה טוב נוסף: מרווח של לא יותר מכ-30% בין נקודות סמוכות. בדיקה עם נקודות מקובצות תיתן התאמת פרבולה מוטה ו-BEP שגוי. פרוס את הנקודות, אל תקבץ אותן.



איור 25.1 · חמש נקודות הבדיקה מדוגמה 25.1 (נקודות זהב ממוספרות, עם הילה לבנה) פרוסות סביב עקום ה- H - Q של היצרן (טורקיז), בתוך מסדרון הסבולת של דרגה 2: גוון טורקיז בהיר ששוליו המקווקווים הם $\pm 3\%$ בעומד. הנקודות יושבות מעט מתחת לעקום היצרן, חתימה אופיינית לבלאי קל, אך כולן בתוך הרצועה, ולכן הסטייה מהמובטח בגבול המותר. נקודה 4 היא נקודת ה-BEP ומסומנת בכוכב, בסביבות $Q \approx 55 \text{ m}^3/\text{h}$. עמידה ברצועת היצרן אינה עמידה בסף הרגולטורי, ראו הדוגמה.

מבוסס על בדיקת חמש נקודות, דוגמה 25.1 · קנה מידה סכמטי

שתי השוואות נגזרות מהעקום הנמדד. הראשונה היא **מול עקום היצרן**: כמה ירדנו מהמקור. נקודות שנופלות הרבה מתחת לרצועת הסבולת מצביעות על בלאי, על טבעות שחיקה פתוחות (פרק 5) או על מאיץ שחוק. השנייה היא **מול הצי**: איפה המשאבה הזו עומדת ביחס למשאבות דומות באותו מתקן או אצל אותו לקוח. משאבה אחת ב-62% בתוך צי שכולו ב-70% היא חשודה, גם אם 62% לבדו עובר את הסף.

SEC, המספר שמתרגם נצילות לכסף

נצילות באחוזים היא מדד הנדסי, אבל מנהל מתקן חושב בקובים ובאגורות. ה-SEC מגשר בין השניים. הוא אומר כמה קילוואט-שעה צריך כדי להזיז קוב מים אחד, ולכן הוא תלוי לא רק בנצילות אלא גם בעומד: ככל שמרימים גבוה יותר, צריך יותר אנרגיה לקוב, גם במשאבה מושלמת.

טבלה 25.2 • טווחי SEC אופייניים לפי סוג מתקן (התמצאות)

סוג מתקן	טוב SEC	דורש טיפול	הערה
בוסטר / משטחית, עומד נמוך	0.20–0.35	0.45 >	עומד קטן, רגיש מאוד לנצילות
משאבת בור, $H \approx 80$ m	0.35–0.45	0.55–0.80	SEC גבוה כי העומד גבוה מטבעו
ביוב / שפכים	0.10–0.20	0.25 >	עומד נמוך, מאיץ פתוח

עליית SEC לאורך זמן = הסימן הכספי הברור ביותר

הערך המוחלט של SEC משתנה ממתקן למתקן, ולכן קשה להשוות אותו ישירות. אבל **המגמה** של אותו מתקן לאורך השנים היא אבחנתית לחלוטין. משאבת בור שנמדדה ב-0.42 לפני שלוש שנים והיום ב-0.55 איבדה כרבע מיעילותה, וזה מתורגם ישירות לעלייה של כ-30% בחשבון החשמל של אותה משאבה. זה הנימוק החזק ביותר לבעלים: לא אחוז נצילות מופשט, אלא אגורות לקוב שעולות שנה אחר שנה.

דוגמה מקצה לקצה: בדיקת בור חמש-נקודתית

דוגמה 25.1 • בדיקת נצילות שדה על משאבת בור, מנקודות מדידה ועד פסק רגולטורי

בדיקת שדה על משאבת בור טבולה במתקן מים. נמדדו חמש נקודות עבודה בעזרת מנתח הספק תלת-פאזי בלוח ומד ספיקה אולטרסוני, עם מד מפלס דינמי בקידוח. נחשב נצילות ו-SEC לכל נקודה, נאתר את ה-BEP, ונכריע מול הסף.

(תלת-פאזי) $U = 400 \text{ V}$ $\cos \varphi = 0.85$ משאבת בור → סף 55% סיג

חמש נקודות המדידה הגולמיות וההספק הנגזר מהן ($P_1 = \sqrt{3} \cdot 400 \cdot I \cdot 0.85 / 1000$):

SEC	H (%)	P_H (KW)	H (M)	Q (M^3/H)	P_1 (KW)	I (A)	#
0.513	41.5	5.97	78.2	28.0	14.37	24.4	1
0.435	46.1	7.12	73.6	35.5	15.43	26.2	2
0.369	50.6	8.44	68.5	45.2	16.67	28.3	3
0.329	51.5	9.27	62.1	54.8	18.02	30.6	4
0.308	48.5	9.33	54.8	62.5	19.26	32.7	5

1 נחשב הספק חשמלי לנקודה 3 (נקודת העבודה):

$$P_1 = \sqrt{3} \cdot 400 \cdot 28.3 \cdot 0.85 / 1000 = 16.67 \text{ kW}$$

2 הספק הידראולי מועיל באותה נקודה:

$$P_H = Q \cdot H / 367 = 45.2 \cdot 68.5 / 367 = 8.44 \text{ kW}$$

3 נצילות כוללת בנקודת העבודה:

$$\eta = P_H / P_1 \cdot 100 = 8.44 / 16.67 \cdot 100 = 50.6\%$$

4 צריכה סגולית: $SEC = P_1 / Q = 16.67 / 45.2 = 0.369 \text{ kWh/m}^3$

5 איתור ה-BEP: הנצילות הגבוהה ביותר בנקודה 4 →

$$Q_{BEP} = 54.8 \text{ m}^3/\text{h}, \quad \eta_{BEP} = 51.5\%$$

תוצאה: בנקודת העבודה $\eta = 50.6\%$, ואפילו ב-BEP רק 51.5%. שתיהן מתחת לסף 55% למשאבת בור. המשאבה אינה עומדת בדרישות הרגולציה. SEC של 0.369 בנקודת העבודה גבוה ל- $H \approx 68 \text{ m}$, ומאשר את האבחנה: המשאבה מבזבזת אנרגיה לאורך כל טווח העבודה.

מה הסבולת אומרת על ההכרעה? אי-הוודאות המורחבת על הנצילות (כיסוי $k=2$, 95%) במכשור שדה טוב היא בערך ± 2.2 נקודות (פרק 4). הפער עד הסף הוא $55 - 50.6 = 4.4$. נקודות, גדול מאי-הוודאות. לכן הכישלון מובהק סטטיסטית, לא תוצאה של רעש מדידה. אם הפער היה נקודה אחת בלבד, היה צריך לחזור על הבדיקה במכשור מדויק יותר לפני פסק "נכשל".

הצעד הבא: משאבה שנכשלת לא נפסלת אוטומטית להחלפה. קודם בודקים את מרווחי טבעות השחיקה (פרק 5), שלעיתים קרובות מחזירים 3 עד 8 נקודות נצילות בעלות זניחה. רק אם השיפוף לא מספיק, עוברים לניתוח הכלכלי של החלפה מול שיפוף בפרק 27.

תעודת יעילות, קוד QR וספי הרגולציה

מספר נצילות בלי תיעוד הוא שמועה. תוצאת הבדיקה מתועדת ב **תעודת יעילות** (*efficiency certificate*), מסמך תמציתי בעמוד אחד שנושא את זהות המשאבה, נקודת העבודה, הנצילות ו-SEC, את הפסק מול הסף, ואת תאריך הבדיקה הבאה. רבים מצרפים לה קוד QR שמקשר לדוח המלא, כך שכל מי שעומד מול המשאבה בשטח יכול לסרוק ולראות את "תעודת הזהות האנרגטית" המעודכנת שלה.

טבלה 25.3 • ספי נצילות כוללת ומחזור בדיקה (משרד האנרגיה)

סוג משאבה	סף נצילות כוללת	מחזור בדיקה חוזרת	הערה
משטחית / בוסטר	65%	חודשים 30	או 7,500 שעות הפעלה, המוקדם
בור / טורבינה אנכית	55%	חודשים 30	VTP, טבולה בקידוח
ביוב / שפכים	50%	חודשים 30	סף לא-פורמלי, מקובל בדוחות

מחזור הבדיקה החוזרת: 30 חודשים

בגוף מבוקר (צריכה שנתית מעל 1,250 טון שווה ערך נפט) כל משאבה חייבת בבדיקת נצילות מתועדת אחת ל-30 חודשים, או כל 7,500 שעות הפעלה, המוקדם מביניהם. תזכורת מחזור הבדיקה היא חלק מניהול הצי: משאבה שתאריך הבדיקה שלה חלף אינה רק סיכון רגולטורי, היא גם משאבה שאיש לא יודע כמה היא מבזבזת כרגע. נהל את הלוח, לא רק את הבדיקה הבודדת.

30

חודשים
בין בדיקות

55%

סף בור
נצילות כוללת

-4.5

סבולת נצילות
דרגה 2 (נק')

5

נקודות מדידה
מינימום בכל בדיקה
(סעיף 5.7.1)

אז מה? מה שלא נמדד, לא מנוהל. בדיקת ISO 9906, ולו בדרגה 2 בשטח, הופכת תחושה למספר אחראי. בדיקת wire-to-water פשוטה מודדת שלושה גדלים ומחזירה נצילות ו-SEC, ואלה חושפים בדיוק כמה המשאבה מבזבזת. חמש נקודות בונות עקום ו-BEP, ההשוואה לעקום היצרן ולצי מאתרת את החריגים, והתיעוד בתעודה עם תאריך בדיקה חוזרת סוגר את המעגל הרגולטורי. זו הבדיקה שמצדיקה כלכלית כל החלטת שיפוץ או החלפה, וכל המספרים שלה זורמים ישר אל ניתוח ההחלפה בפרק 27.

קישורים בספר

שרשרת הנצילות וארבעת האיבודים שמאחורי המספר הכולל נדונו בפרק 4. עקומות המאפיין שאליהן משווים את הנקודות הנמדדות נקראות בפרק 13. אבחון קוויטציה, שיכול לעוות בדיקת נצילות בספיקות גבוהות, בפרק 15. וההכרעה הכלכלית שמבוססת על תוצאות הבדיקה, שיפוץ מול החלפה ומחזור החיים, בפרק 27.

26 איתור תקלות

Troubleshooting

בקצרה

משאבה שמתנהגת לא טוב **מדברת בתסמינים**: אין ספיקה, לחץ נמוך, רעש, רעידות, התחממות, דליפה, הספק מטפס. כל תסמין מצביע על מספר מצומצם של סיבות. הפרק הזה הוא **מטריצת איתור תקלות** מסודרת, תסמין ← סיבה אפשרית ← איך בודקים ← מה עושים, מותאמת לתחנות שאיבה ישראליות.

שני עקרונות מנחים כל אבחון. ראשית, **עובדים מהזול והחיצוני אל היקר והפנימי**: כיוון סיבוב, אוויר, מפלס, שסתום ויישור נבדקים לפני שמפרקים מאיץ. שנית, רוב התקלות אינן במשאבה עצמה אלא **ביניקה, באוויר, ביישור או בבלאי**. מי שמכיר את המטריצה פותר תקלות במקום להחליף חלקים בתקווה.

איך לקרוא תסמין: שיטת האבחון

אבחון טוב אינו ניחוש. הוא תהליך מסודר שמתחיל בשאלה אחת: מה השתנה, ומתי. ברגע שמצמצמים את התסמין למספר, האבחון כמעט נסגר מעצמו.

לפני שנוגעים במשאבה, אוספים שלושה דברים פשוטים: מה **התסמין המדויק** (אין ספיקה? ספיקה ירדה? רעש חדש?), **מתי הוא התחיל** (פתאום, בבת אחת, או הדרדרות איטית לאורך חודשים), ו**מה השתנה לפניו** (פירוק אחרון, ייבוש מאגר, החלפת מנוע, תחילת הקיץ). הדרדרות איטית מצביעה כמעט תמיד על בלאי, טבעות שחיקה או מאיץ. תקלה פתאומית מצביעה על אירוע, סתימה, כיס אוויר, סיבוב הפוך אחרי תיקון, או שסתום שנסגר.

הכלי החזק ביותר באבחון אינו מברג אלא **מספר**. מד לחץ ביניקה ובסניקה, מד ספיקה, ומדידת הספק בלוח ($P_1 = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \cos\varphi / 1000$) ממקמים את נקודת העבודה על העקום ומבדילים בין משאבה חולה למערכת חולה. מדידת רעידות (פרק 24) ובדיקת נצילות (פרק 25) מכוונות לסיבה הנכונה לפני שמפרקים משהו.

הנעה ראשונית / מילוי *priming* ·

גירוש האוויר ומילוי גוף המשאבה וצינור היניקה בנוזל לפני ההפעלה. משאבה צנטריפוגלית רגילה אינה שואבת אוויר ולכן חייבת להיות מלאה כדי להתחיל לעבוד.

כיס אוויר *air lock / air pocket* ·

כיס אוויר לכוד בנקודה גבוהה בצנרת היניקה. חוסם את מעבר הנוזל ומונע יצירת ואקום, גם כשהמשאבה מלאה לכאורה.

שאיבת אוויר *air entrainment* ·

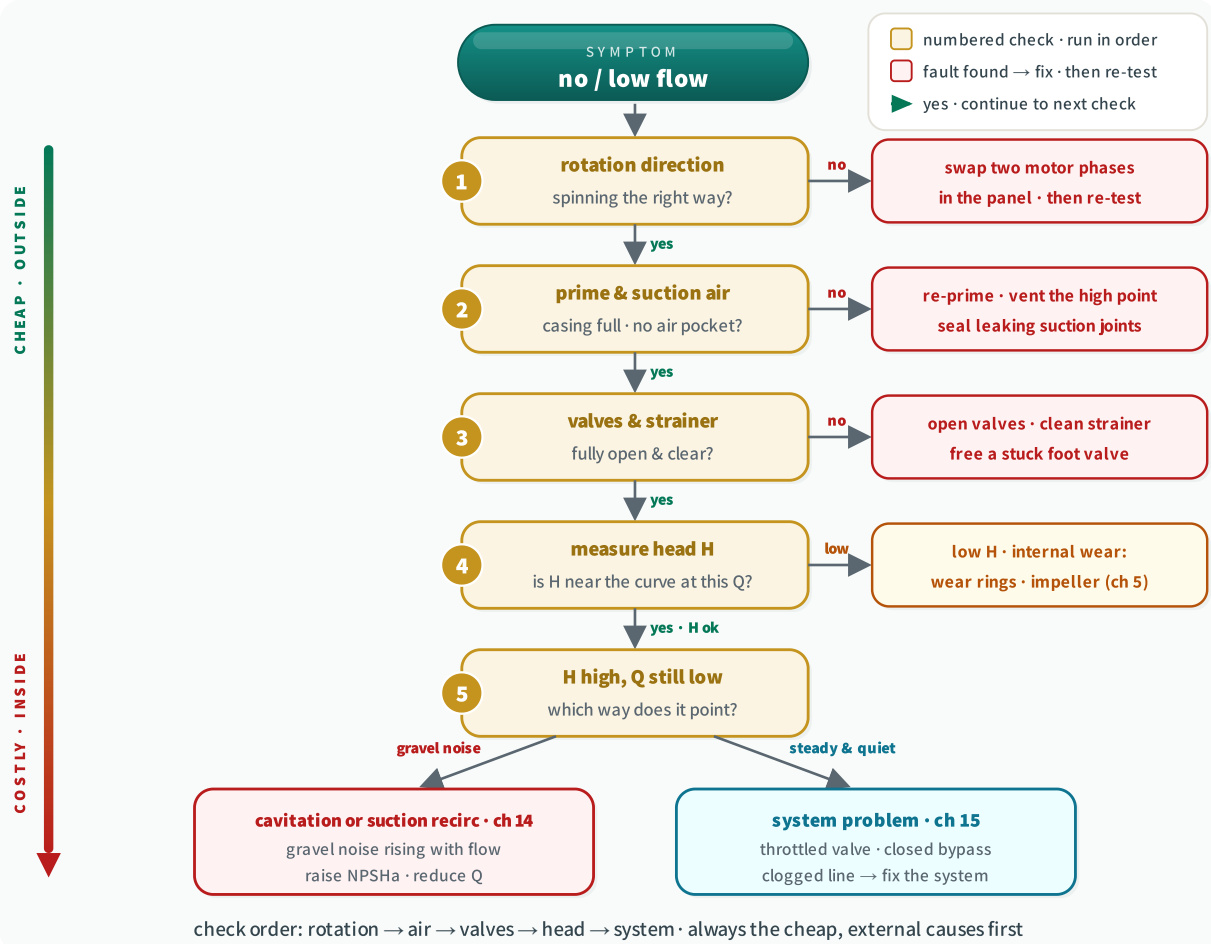
שאיבת בועות אוויר אל תוך הנוזל, בדרך כלל ממערבולת בבריכת היניקה או מחיבור יניקה דולף. מורידה ספיקה ועומד ויוצרת רעש וספיקה לא יציבה.

רה-סירקולציה *recirculation* ·

זרימה חוזרת אלימה בתוך המאיץ בספיקות נמוכות מאוד (הרחק משמאל ל-BEP). מקור לרעידות, רעש, התחממות ובלאי, ולעיתים מתבלבל עם קוויטציה.

עץ אבחון: אין ספיקה או ספיקה נמוכה

התלונה הנפוצה ביותר היא "המשאבה עובדת אבל לא מספקת מים". איור 26.1 מוביל מהתסמין הזה אל הסיבה בכמה בדיקות זולות, מהחוץ אל הפנים. כמעט תמיד התשובה נמצאת לפני השלב שבו צריך לפרק את המשאבה.



איור 26.1 · עץ אבחון לתסמין "אין ספיקה או ספיקה נמוכה". בודקים מלמעלה למטה לפי המספור: כרטיסי זהב הם בדיקות, כרטיסים אדומים הם הפעולה המתקנת כשנמצאה הסיבה, וירוק פירושו "תקין, המשך הלאה". כרטיס ענבר: ממצא של בלאי פנימי; כרטיס תכלת: הבעיה במערכת ולא במשאבה. הסרגל הצבעוני משמאל מזכיר את העיקרון: מהבדיקה הזולה והחיצונית אל היקרה והפנימית. עומד נמוך מצביע על בלאי פנימי; עומד תקין עם ספיקה נמוכה מצביע החוצה, אל המערכת או אל קוויטציה.

סכמטי · רצף אבחון לפי עיקרון "מהחוץ אל הפנים"

למה כיוון הסיבוב ראשון

אחרי כל תיקון חשמלי, החלפת מנוע או חיבור מחדש לרשת, שני חוטי פאזה עלולים להתחלף והמשאבה תסתובב הפוך. משאבה צנטריפוגלית שמסתובבת אחורה עדיין בונה לחץ מסוים (לרוב 40–60% מהעומד התקין) ומזרימה מעט, ולכן **נראית עובדת אך מספקת חצי**. זו טעות קלאסית שנפתרת בשנייה בלוח, ולכן היא תמיד הבדיקה הראשונה אחרי כל עבודה.

מטריצה 1 · ספיקה ועומד

הקבוצה הראשונה מכסה את שני התסמינים הנפוצים ביותר: אין ספיקה כלל בהפעלה, וספיקה או עומד נמוכים מהמצופה. לכל שורה: הסיבה הסבירה, איך מאמתים אותה בשטח, ומה הפעולה המתקנת.

תסמין	סיבה אפשרית	איך בודקים	פעולה מתקנת
אין ספיקה / עומד בהפעלה no flow at startup	המשאבה לא מולאה (אין מילוי, prime)	פתח את פתח האוורור העליון, בדוק אם יוצא נוזל או אוויר	מלא את הגוף וצינור היניקה, שחרר אוויר עד יציאת מים רציפה
	כיוון סיבוב הפוך	השווה לחץ סניקה למצופה, בדוק חץ כיוון על הגוף	החלף שני חוטי פאזה בלוח, ודא פאזה תקינה
	שסתום סגור או חסום ביציאה / כניסה	עקוב אחר קו הסניקה והיניקה, בדוק מצב כל שסתום	פתח שסתומים, ודא ששסתום תחתון (foot valve) נפתח
	כיס אוויר ביניקה / שאיבת אוויר	בדוק נקודות גבוהות בצנרת, חפש חיבור דולף, ערבול בבריכה	אוורר את הכיס, אטם חיבורים, הנמך כניסה בבריכה
ספיקה / עומד נמוכים המצופה insufficient flow / head	מאיץ או טבעות שחיקה שחוקים (נזילה פנימית)	בדיקת נצילות (פרק 25), השווה H-Q לעקום היצרן, מדוד מרווחי טבעות	החלף טבעות שחיקה (הזול), במצב חמור החלף מאיץ
	מאיץ חתוך מדי או מאיץ שגוי	אמת קוטר מאיץ מול גיליון הנתונים והעקום	התקן מאיץ בקוטר נכון, ראה חוקי דמיות (פרק 14)
	מהירות סיבוב נמוכה (תדר / החלקה / VFD)	מדוד תדר ו-rpm, בדוק הגדרת VFD ומתח רשת	החזר תדר ל-50 Hz, בדוק החלקת מנוע ומתח (פרק 19)
	שאיבת אוויר / מערבולת בבריכה	חפש מערבולת מעל הכניסה, ספיקה לא יציבה, רעש	שפר תכן בריכת יניקה, הגדל טבילה, מחיצות נגד מערבולת (פרק 23)
	מסנן / רשת יניקה חסומים חלקית	השווה לחץ לפני ואחרי המסנן, בדוק ירידת לחץ	נקה או החלף מסנן, קבע תחזוקה מחזורית
	עקום המערכת גבוה מהמתוכנן	מדוד H בנקודת העבודה, חשב עקום מערכת (פרק 16)	הקטן איבודים, בדוק שסתום שנוק / קו חסום / הרמה סטטית גבוהה

משאבה חולה או מערכת חולה

שתי בעיות שונות לגמרי נראות אותו דבר ללקוח: "אין מספיק מים". מדידת העומד מפרידה ביניהן. אם המשאבה מספקת עומד תקין אבל ספיקה נמוכה, המשאבה בריאה והבעיה במערכת, קו חסום, שסתום שנוק או הרמה סטטית גבוהה מהמתוכנן. אם היא מספקת עומד נמוך בספיקה הנכונה, המשאבה עצמה שחוקה. אל תחליף מאיץ כשהבעיה היא שסתום שנוק, ואל תפתח קו כשהמאיץ שחוק.

מטריצה 2 • רעידות, רעש וקוויטציה

רעידות ורעש הם השפה שבה המשאבה מדווחת על מצוקה מכנית או הידראולית. כל חתימת רעידה מצביעה על משפחת סיבות שונה, ולכן מדידת רעידות מסודרת (פרק 24) ממקדת את האבחון לפני כל פירוק. קוויטציה היא מקרה מיוחד עם חתימת רעש משלה.

טבלה 26.2 • תסמיני רעידות, רעש וקוויטציה

תסמין	סיבה אפשרית	איך בודקים	פעולה מתקנת
רעידות ורעש מוגברים excessive vibration & noise	אי-איזון של רוטור / מאיץ	FFT: שיא ב-1x תדר סיבוב (פרק 24)	אזן את הרוטור, נקה משקעים מהמאיץ, בדוק בלאי לא אחיד
	יישור לקוי בין מנוע למשאבה	FFT: שיא ב-2x, רעידה צירית גבוהה	יישר בלייזר עד תקן, בדוק רגל רכה ועיגון (פרק 6, 22)
	קוויטציה	רעש "חצץ", שיא רחב-פס בתדר גבוה, ספיקה לא יציבה	בדוק NPSH (פרק 15), הורד ספיקה, נקה יניקה
	עבודה רחוק מ-BEP / רה-סירקולציה	בדוק נקודת עבודה מול BEP, שיא בתדר מעבר הלהבים (BPF)	קרב ל-BEP, חתוך מאיץ או הוסף VFD (פרק 14, 20)
	רפיון מכני (עיגון, ברגים, מסב)	FFT: הרמוניות רבות, רעידה לא יציבה	הדק עיגון וברגים, מלא תושבת (grouting), בדוק מסב (פרק 23)
	ציר עקום / רזוננס מבני	בדוק סטייה (run-out), מבחן הולם (bump test) לתדר עצמי	החלף / יישר ציר, שנה קשיחות עיגון להרחקת רזוננס (פרק 6)
רעש "חצץ" אופייני gravel / cavitation noise	NPSHa לא מספיק → קוויטציה (פרק 15)	חשב NPSHa בנקודת העבודה, בדוק מפלס מקור וטמפרטורה	הנמך משאבה / העלה מקור, הגדל קוטר יניקה, נקה מסנן, הורד ספיקה

קוויטציה מול רה-סירקולציה: אותו רעש, סיבה הפוכה

שני הגורמים נשמעים כמו חצץ במשאבה, אך הם הפוכים בכיוון. קוויטציה קלאסית מחמירה כשמזרימים יותר (ימינה מ-BEP), כי NPSHr עולה ו-NPSHa יורד עד שהם נפגשים (פרק 15). רה-סירקולציה ביניקה מחמירה כשמזרימים פחות (הרחק שמאלה מ-BEP), כשהזרימה בתוך עין המאיץ מתהפכת. אם הרעש גובר כששונקים, החשד הוא רה-סירקולציה, והפתרון הוא להעלות ספיקה, לא להוריד. תמיד שאל "באיזה כיוון הרעש מחמיר" לפני שאתה פועל.

מטריצה 3 • התחממות, אטם, הספק ובלאי

הקבוצה השלישית מכסה את התסמינים האחזקתיים: מסבים או משאבה שמתחממים, אטם שדולף, הספק או זרם שמטפסים, ובלאי שמתרחש מהר מהצפוי. כאן נופלות רוב קריאות החירום היקרות, ולכן זיהוי מוקדם מציל ציוד.

טבלה 26.3 • תסמיני התחממות, אטם, הספק ובלאי

תסמין	סיבה אפשרית	איך בודקים	פעולה מתקנת
התחממות מסבים / משאבה bearing / pump overheat	סיכה לקויה (חסר / עודף / מזוהמת)	בדוק מפלס וצבע שמן, מדוד טמפ' מסב (תרמומטר / IR)	תקן סיכה לפי המפרט, החלף שמן מזוהם, הימנע מהגזמה
	יישור לקוי / עומס מסב	יישור לייזר, בדוק כוח צירי ורדיאלי (פרק 8)	יישר מחדש, בדוק מצמד וקשיחות העיגון
	ספיקה נמוכה מאוד / עבודה מול שסתום סגור	בדוק ספיקה מינימלית, טמפ' הנוזל בגוף עולה	הבטח ספיקה מינימלית, התקן קו רה-סירקולציה (פרק 21)
	מסב בכשל (בלאי, חלודה, חדירת מים)	מדידת רעידות, רעש מסב, בדיקת מרווח	החלף מסב, שדרג אטימה, בדוק חדירת מים לבית המסב
דליפת אטם ציר seal leakage	אטם מכני בלוי / פגום (פרק 7)	בדוק קצב טפטוף, סימני חום או שריטה על משטחי האטם	החלף את האטם המכני כמכלול, ודא ניקיון ההרכבה
	ריצה יבשה / חוסר נוזל שטיפה (flush)	בדוק תוכנית שטיפה (API plan), ספיקת ולחץ הנוזל	ודא אספקת flush, מנע ריצה יבשה, התקן הגנת ריצה-יבשה
	יישור לקוי / לחץ תא אטם חריג / רטט	בדוק יישור, מדוד לחץ תא האטם מול המפרט	יישר, תקן את תוכנית האטם, בדוק איזון דחף (פרק 8)
הספק / זרם גבוה • עומס יתר high power / motor overload	עבודה ימינה מ-BEP (ספיקה גבוהה מדי, במשאבות רדיאליות; באקסיאליות ההספק עולה דווקא בספיקה נמוכה)	מדוד $P_1 = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \cos\phi / 1000$, מקם נקודת עבודה	שנוק מעט בסניקה לקירוב ל-BEP, בדוק עקום מערכת (פרק 16)
	צפיפות / צמיגות גבוהה, או חיכוך מכני / חסימה	בדוק טמפ' ונוזל, סובב ביד, חפש חיכוך מאיץ-גוף	תקן בחירת מנוע לנוזל, שחרר חיכוך מכני, נקה חסימה
בלאי מהיר rapid wear	חול / אברסיביות, קוויטציה, עבודה רחוק מ-BEP, יישור לקוי	בדוק חומר מול הנוזל (פרק 9), NPSH (פרק 15), נקודת עבודה ויישור	שדרג חומר / ציפוי, טפל ב-NPSH, קרב ל-BEP, יישור מחדש

מטריצה 4 • חשמל ואיבוד מילוי

הקבוצה האחרונה מכסה תקלות חשמל, הגנת מנוע שנופלת, ואיבוד מילוי חוזר, תסמין מתסכל במיוחד שגורם למשאבה "לשכוח" איך לעבוד אחרי כל כיבוי.

טבלה 26.4 • תסמיני מנוע, חשמל ואיבוד מילוי

תסמין	סיבה אפשרית	איך בודקים	פעולה מתקנת
המנוע נופל / מאמ"ת מנתק motor trips	עומס יתר מכני (חסימה, חיכוך, סיבוב הפוך)	סובב ביד, בדוק כיוון, מדוד זרם בכל פאזה	שחרר חסימה, תקן כיוון, ודא סיבוב חופשי
	מנוע תת-מידתי לנקודת העבודה	חשב הספק נדרש מול תווית המנוע ו-BEP	שנוק לקירוב ל-BEP או התקן מנוע מתאים (פרק 19)
	בעיה חשמלית: מתח נמוך, חוסר פאזה, מגעים	מדוד מתח בשלוש פאזות, בדוק מגעים והדקים	תקן הזנה, החלף מגען, הדק חיבורים
	הגנה מכוילת נמוך / מסב או אטם נתפסים	השווה כיול מאמ"ת לזרם נומינלי, מדוד רעידות	כייל הגנה נכון, החלף מסב / אטם תפוס
איבוד מילוי חוזר loss of prime	נזילת אוויר בחיבורי יניקה	מבחן לחץ / ואקום על קו היניקה, חפש בועות	אטם חיבורים ואוגנים, החלף אטמים, הדק חיבורי שאיבה
	שסתום תחתון (foot valve) דולף / תקוע	בדוק החזקת מים אחרי עצירה, פרק ובדוק את השסתום	תקן או החלף שסתום תחתון, נקה לכלוך מהמושב
	כיס אוויר בנקודה גבוהה / מערבולת בבריכה	מפה את הצנרת, חפש נקודה גבוהה, בדוק טבילת כניסה	סדר צנרת בשיפוע עולה אל המשאבה, הגדל טבילה (פרק 23)

סדר העבודה הנכון

לפני שפותחים את המשאבה, בדוק את הזול והחיצוני בסדר הזה: **כיוון סיבוב** ← **אוויר ביניקה** ← **מפלס מקור** ← **שסתומים ומסננים** ← **יישור** ← **מהירות**. רוב התקלות נפתרות מבחוץ, בלי כלים מיוחדים. פתיחת המשאבה והחלפת מאיץ הן המוצא האחרון, לא הראשון. מדידת רעידות, עומד והספק מכוונות אותך לסיבה הנכונה לפני שמפרקים משהו ולפני שמזמינים חלק יקר.

מנהל אחזקה מדווח שמשאבת בור "מספקת פחות מים בחודשים האחרונים". אין רעש חריג, אין נפילת מנוע, ההידרדרות איטית. נשתמש בעץ האבחון (איור 26.1) ובמידה כדי לאתר את הסיבה במקום לנחש.

$$Q_{\text{base}} = 45 \text{ m}^3/\text{h} \text{ (בדיקה לפני שנתיים)} \quad Q_{\text{now}} = 38 \text{ m}^3/\text{h} \text{ (נמדד היום)}$$

$$H = 70 \text{ m} \text{ (נמדד, ללא שינוי)} \quad \text{סיבוב} = \text{תקין} \cdot \text{אוויר} = \text{אין} \cdot \text{שסתומים} = \text{פתוחים}$$

1 שלבים 1–3 בעץ: כיוון סיבוב תקין, אין אוויר, שסתומים פתוחים. התסמין לא חיצוני:

rotation ok · primed · valves open → go internal

2 שלב 4, מדידת עומד: ה-H נשאר 70 m אבל הספיקה ירדה. עומד נשמר, ספיקה נופלת, זו חתימת נזילה פנימית:

H steady, Q ↓ → internal leakage suspected שימולב: על

העקום המקורי, ב- $38 \text{ m}^3/\text{h}$ המשאבה הייתה אמורה לתת עומד גבוה מ-70 m. העומד "נשמר" רק כי המערכת קובעת אותו, כלומר הנקודה נפלה אל מתחת לעקום, בניגוד למקרה "מערכת חולה" שבו הנקודה נשארת על העקום.

3 אומדן הירידה היחסית בספיקה:

$$\Delta Q = (45 - 38) / 45 \times 100 = 15.6\%$$

4 בדיקת נצילות (פרק 25) מאשרת ירידת ה-Q ללא קוויטציה וללא תקלת מנוע. החשוד מספר 1 לפי פרק 5: טבעות שחיקה שנפתחו:

worn wear rings → internal recirculation

אבחון: **טבעות שחיקה שחוקות**. עומד תקין עם ספיקה שירדה 15.6% והידרדרות איטית מצביעים על נזילה פנימית, לא על מערכת ולא על קוויטציה. **הפתרון הזול קודם:** החלפת זוג טבעות שחיקה, לא מאיץ ולא משאבה.

כמה זה שווה בכסף? נניח שהמשאבה רצה 6,000 h/yr בהספק $P_1 \approx 12 \text{ kW}$, ושהחזרת הנצילות חוסכת כ-8% מההספק. בתעריף אומדן למתח נמוך 0.50/kWh (ללא מע"מ, פרק 27):

$$\text{חיסכון} \approx 12 \times 0.50 = 6 \text{ ש"ח} \times 0.08 \times 6,000 \text{ h} \times \text{kW} / \text{שנה}$$

זוג טבעות שחיקה עולה שבריר ממאיץ חדש ומחזיר את עצמו בחודשים ספורים. **האבחון הנכון הוא גם החלטה כלכלית.**

הלקח: מדידה אחת של עומד הפרידה בין שלוש השערות, מערכת, קוויטציה ובלאי, וכיוונה ישר אל הפתרון הזול. בלי המדידה היה קל להחליף מאיץ יקר על לא כלום.

טבלה 26.5 • כרטיס כיס: התסמין ושלוש הבדיקות הראשונות (כלי עזר)

תסמין	בדיקה 1 (הזולה)	בדיקה 2	בדיקה 3	פרק קשור
אין ספיקה	כיוון סיבוב	מילוי / אוויר	שסתומים	15, 21
ספיקה / עומד נמוכים	מדוד H מול עקום	מסנן / מהירות	טבעות שחיקה	5, 23
רעש "חצץ"	NPSHa	מפלס מקור	ספיקה מול BEP	14
רעידות	$\times FFT 1 \times 2$	יישור	BEP / רפיון	6, 22
התחממות מסב	סיכה	יישור	ספיקה מיני	6, 19
דליפת אטם	flush / ריצה יבשה	יישור	מצב האטם	7
הספק גבוה	נקודת עבודה	צמיגות / צפיפות	חיכוך מכני	16, 18
נפילת מנוע	סיבוב חופשי	מתח / פאזות	כיול הגנה	18
בלאי מהיר	חומר מול נוזל	NPSH	BEP / יישור	9, 14
איבוד מילוי	נזילת אוויר	שסתום תחתון	כיס אוויר	21

מתי לעצור ולקרוא למומחה

חלק מהתסמינים אינם בעיית אחזקה אלא דגל אדום בטיחותי. **התחממות מהירה של מסב, ריח חרוך מהמנוע, רעידה שמטפסת בחדות, או רעש מתכתי חד, כל אלה מצדיקים עצירה** ולא המשך הפעלה. הפעלה "רק עוד קצת" של משאבה שמתחממת או רועדת בחוזקה עלולה להרוס מסב, ציר או מאיץ תוך דקות, ולהפוך תיקון זול לתקלה יקרה. כשבספק, עצור, מדוד, ורק אז החלט.

אז מה? התסמין מצביע על הסיבה, והמדידה מכריעה ביניהן. מטריצת איתור תקלות מסודרת חוסכת שעות ניחושים וחלקים מיותרים. עובדים מהזול והחיצוני אל היקר והפנימי, כיוון סיבוב ואוויר לפני מאיץ, ונעזרים בעומד, רעידות ונצילות כדי לכוון. רוב התקלות אינן במאיץ אלא ביניקה, באוויר, ביישור או בבלאי, ורבות נפתרות בדקות מבלי לפתוח את המשאבה. מי שמכיר את המטריצה הזו פותר תקלות במקום להחליף חלקים בתקווה, ומבדיל בין משאבה חולה למערכת חולה לפני שהוא מוציא כסף.

קישורים בספר

אטם ציר ודליפותיו בפרק 7. NPSH וקוויטציה, מקור רעש ה"חצץ", בפרק 15. עקום המערכת ונקודת העבודה, ההבחנה בין משאבה חולה למערכת חולה, בפרק 16. בחירה נכונה שמונעת עבודה רחוק מ-BEP בפרק 17. מנועים, הנעה ונפילות מאמ"ת בפרק 19. ויסות ספיקה וקו רה-סירקולציה בפרק 21. התקנה, יישור ותכן בריכת יניקה בפרק 23. רעידות, FFT וניטור מצב בפרק 24. בדיקת נצילות שמאשרת בלאי פנימי בפרק 25. כלכלת ההחלטה, תיקון מול החלפה, בפרק 27.



חלק תשיעי

כלכלה, רגולציה ועתיד

Economics, Regulation & the Future

כלכלת אנרגיה ועלות מחזור-חיים 27

נוף התקנים והעתיד 28

27 כלכלת אנרגיה ועלות מחזור-חיים

Energy Economics & Life-Cycle Cost

בקצרה

מחיר הרכישה של משאבה הוא קצה הקרחון. במשאבה שעובדת אלפי שעות בשנה, **החשמל** הוא בדרך כלל 80 עד 90 אחוז **מעלות מחזור החיים**, וכל היתר, הרכישה, ההתקנה והאחזקה, מצטופף בעשירית עד החמישית הנוותרת. לכן משאבה זולה שמבזבזת חשמל היא לרוב היקרה ביותר לאורך חייה.

הפרק הזה נותן את שלושת הכלים שהופכים הנדסה לכסף: מסגרת ה-**LCC** על שמונת רכיביה לפי Hydraulic Institute, את חשבון ה-**NPV** שמשווה מחיר נמוך מול נצילות גבוהה לאורך 15 שנה, ואת **כלל תמחור החשמל** שמפריד בין עלות בפועל לאומדן קדימה. הם חוזרים בכל החלטת רכישה, שיפוץ ושדרוג בספר.

שימו לב לתעריף

כל הדוגמאות הכספיות בפרק מחושבות בתעריף 0.40 ש"ל לקוט"ש (מתח גבוה, ללא מע"מ, אומדן 2026) או 0.50 ש"ל (מתח נמוך). התעריפים מתעדכנים מדי שנה. כדי להתאים כל תוצאה לתעריף שלכם: הכפילו את התוצאה ביחס שבין התעריף שלכם ל-0.40.

עלות מחזור חיים: שמונה רכיבים

ההחלטה הכלכלית הנכונה אינה נמדדת במחיר המדבקה, אלא בעלות הכוללת על פני כל חיי המשאבה. זו נקודת המוצא של כל מה שבא אחריה.

עלות מחזור חיים (*Life-Cycle Cost, LCC*) היא סך כל הכסף שמשאבה תעלה מרגע ההזמנה ועד הפירוק, מבוסס בערך של היום. המתודולוגיה המקובלת היא של ה-Hydraulic Institute ו-Europump, והיא מפרקת את העלות לשמונה רכיבים. את כולם מהווים לערך נוכחי כדי שאפשר יהיה לחבר אותם למספר אחד.

$$LCC = C_{ic} + C_{in} + C_e + C_o + C_m + C_s + C_{env} + C_d$$

C_e	עלות האנרגיה לאורך החיים. כמעט תמיד הרכיב הגדול ביותר במשאבות מים. זה הרכיב שהפרק כולו סובב סביבו.
C_{ic}	עלות הרכישה (initial cost): המשאבה, המנוע, הממיר, צנרת ראשונית.
C_{in} / C_o	התקנה והרצה (installation) ותפעול שוטף (operation): כוח אדם, ניטור.
C_m / C_s	אחזקה (maintenance) והשבתה/אובדן ייצור (downtime): חלפים, עבודה, קריאות חירום.
C_{env} / C_d	השפעה סביבתית (environmental) ופירוק בסוף החיים (decommissioning): בדרך כלל קטנים.

טבלה 27.1 • שמונת רכיבי ה-LCC (כלי עזר)

רכיב	סימון	מה הוא כולל	חלק טיפוסי
אנרגיה	C_e	חשמל לאורך כל שנות החיים, בתעריף ובשעות הפעולה	80–90%
רכישה	C_{ic}	משאבה, מנוע, ממיר תדר, לוח, צנרת ראשונית	5–12%
אחזקה	C_m	חלפים, אטמים, טבעות שחיקה, שיפוצים תקופתיים	2–7%
התקנה והרצה	C_{in}	הצבה, חיווט, יישור, הרצה ראשונית (commissioning)	1–5%
תפעול	C_o	כוח אדם, ניטור, אנרגיה לעזרים	1–3%
השבתה / אובדן	C_s	הפסקת אספקה, קריאות חירום, אובדן ייצור	משתנה
סביבתי	C_{env}	טיפול בנוזלים, פינוי, רעש	< 1%
פירוק	C_d	פירוק והשבתה בסוף החיים	< 1%

למה דווקא האנרגיה בולעת את הכול

הסיבה פיזיקלית, לא חשבונאית. משאבה בינונית שואבת הספק של עשרות קילוואט, רצה אלפי שעות בשנה, וחיה 15 שנה ויותר. מכפלת ההספק בשעות ובשנים נותנת מיליוני קילוואט-שעה, והכפל בתעריף הופך אותם למיליוני שקלים, וזה מגמד מחיר רכישה חד-פעמי. ככל שהמשאבה רצה יותר שעות, כך משקל האנרגיה גדל. מתחת לערך גס של 2,000 h/yr הרכישה עדיין משמעותית, אבל מעל 2,000 h/yr האנרגיה היא הסיפור.

למה משאבה זולה היא היקרה ביותר

אם האנרגיה היא 85% מהעלות, ההיגיון מתהפך. הפרש של 10 נקודות אחוז בנצילות שווה הרבה יותר מהפרש של אלפי שקלים במחיר הרכישה. משאבה זולה שנצילותה נמוכה ב-10% שורפת את ההפרש הזה כל שנה מחדש, וכבר אחרי שנה-שנתיים העלות המצטברת שלה עוקפת את זו של המשאבה היקרה והיעילה. זו נקודת ההצטלבות (איור 27.2 בהמשך). תחילה נראה את ההתפלגות עצמה.

Life-cycle cost over 15 years • where the money goes

typical surface booster • ≈ 4,000 h/yr • every component discounted to present value (6%)



The lever is efficiency, not price.

2-3 efficiency points ≈ the whole maintenance slice over the pump's life. A 13% energy cut rivals purchase + installation combined.

איור 27.1 • התפלגות עלות מחזור החיים של משאבת מים טיפוסית על פני 15 שנה, בערך נוכחי. פס הזהב הוא החשמל, הרכיב הדומיננטי בפער עצום; הרכישה (טורקיז), האחזקה (חום) והשאר (אפור) נדחסים יחד לכ-16%, המוגדלים בפס התחתון כדי שאפשר יהיה בכלל לראות אותם. לכן כל אחוז נצילות שווה כסף ממשי.

חלקים מבוססי PV @6% • בוסטר בעומס בינוני • להמחשת היחס

המלכודת הקלאסית של רכש

ועדת רכש שבוחרת לפי המחיר הזול ביותר בהצעה מקבעת לעצמה את ההוצאה היקרה ביותר ל-15 שנה. ההפרש בנצילות לא מופיע בכתב הכמויות, הוא מופיע בחשבון החשמל, חודש אחר חודש, הרבה אחרי שהמכרז נסגר. כפי שראינו בפרק 17, בחירת משאבה היא קודם כול תרגיל כלכלי, לא תרגיל מחיר. הזול ביותר לקנייה הוא כמעט תמיד היקר ביותר להחזקה.

הכלים הכלכליים: NPV, IRR והחזר

כדי להשוות שתי משאבות, או הוצאה היום מול חיסכון לאורך שנים, צריך כלי שמתרגם כסף עתידי לכסף של היום. הכלי הזה הוא **היוון** (*discounting*): שקל שנחסך בעוד עשר שנים שווה פחות משקל שנחסך השנה, כי כסף של היום אפשר להשקיע. שלושה מדדים בנויים על ההיוון הזה.

נוסחה 27.2 • ערך נוכחי נקי

$$NPV = -C_0 + \sum S_t / (1 + r)^t$$

C_0	ההשקעה היום (התוספת על המשאבה הזולה, או עלות שדרוג / שיפוץ). [ש]
S_t	החיסכון השנתי בחשמל בשנה t [ש/yr]. אם קבוע, מסכמים עם גורם אנונה.
r	שיעור ההיוון (discount rate). לתאגידי מים ולגופים ציבוריים בישראל נהוג 5-7%. בספר נשתמש ב-6%.
IRR	שיעור התשואה הפנימי: ה- r שמאפס את ה-NPV. $NPV > 0$ פירושו $IRR > r$, כלומר ההשקעה כדאית.

גורם אנונה, קיצור דרך שימושי

כשהחיסכון השנתי קבוע, אין צורך לסכום 15 איברים ביד. סכום ההיוון מתקפל לגורם אנונה אחד: $AF = (1 - (1+r)^{-n}) / r$. עבור $r = 6\%$ ו- $n = 15$ שנה מקבלים $AF \approx 9.71$. כלומר זרם חיסכון של 10,000 ש"ח בשנה שווה היום כ-97,100 ש"ח. הכפלה אחת מחליפה טבלה שלמה.

שני מדדי עזר נוספים מלווים את ה-NPV. **החזר פשוט** (*simple payback*) הוא ההשקעה חלקי החיסכון השנתי, מספר אינטואיטיבי אך מתעלם מהיוון ומחיי הציוד. הוא טוב לסינון מהיר. ה-IRR, שיעור התשואה הפנימי שהוגדר בתיבת הנוסחאות, משלים אותו. ה-NPV, לעומתו, הוא הממד הקובע להחלטה, כי הוא לוקח בחשבון את כל שנות החיים ואת ערך הזמן של הכסף. כלל ההכרעה פשוט: **אם ה-NPV חיובי, ההשקעה מחזירה את עצמה ומעבר לכך.**

תחנת הגברת לחץ צריכה משאבה לנקודת עבודה של $120 \text{ m}^3/\text{h}$ בעומד 55 m , שתרוץ כ- $6,000 \text{ h/yr}$. שתי הצעות על השולחן: **משאבה A** זולה אך נצילותה הכוללת 62% , ו**משאבה B** יקרה ב- $19,000$ ש"ח אך נצילותה 74% . המתח של התחנה הוא מתח גבוה (מ"ג), ולכן תעריף האומדן הוא $0.40/\text{kWh}$ ש"ח ללא מע"מ. מה כדאי לקנות?

$$\eta_A = 62\% \quad \eta_B = 74\% \quad \text{hours} = 6,000 \text{ h/yr} \quad Q = 120 \text{ m}^3/\text{h}, H = 55 \text{ m}$$

$$r = 6\%, n = 15 \text{ yr} \quad \text{rate} = 0.40/\text{kWh} \text{ (מ"ג, ללא מע"מ)} \quad \Delta \text{capex} = 19,000 \text{ (A מעל B)}$$

1 הספק הידראולי מועיל (זהה לשתייה):

$$P_h = Q \cdot H / 367 = 120 \cdot 55 / 367 = 17.98 \text{ kW}$$

2 הספק חשמלי נכנס לכל משאבה:

$$P_{1,A} = 17.98 / 0.62 = 29.0 \text{ kW} ; P_{1,B} = 17.98 / 0.74 = 24.3 \text{ kW}$$

3 חשמל שנתי בכל משאבה:

$$A: 29.0 \cdot 6000 \cdot 0.40 = \text{₪}69,600 ; B: 24.3 \cdot 6000 \cdot 0.40 = \text{₪}58,320$$

4 חיסכון שנתי של B מול A: $S = 69,600 - 58,320 = \text{₪}11,280 / \text{yr}$

5 ערך נוכחי של החיסכון (אנונה $6\%/15\text{yr}$):

$$PV = 11,280 \cdot 9.712 \approx \text{₪}109,600$$

6 ערך נוכחי נקי של בחירת B: $NPV = -19,000 + 109,600 = \text{₪}90,600$

תוצאה: **$NPV = \text{₪}90,600$** לטובת המשאבה היעילה, עם החזר פשוט של **1.7 שנה** בלבד על התוספת. **קונים את B**. התוספת של $19,000$ ש"ח מוחזרת תוך פחות משנתיים, ואחר כך היא רווח נקי של מעל $11,000$ ש"ח בשנה, כל שנה, למשך כל חיי המשאבה.

והעלות הכוללת? נהוון גם את זרם החשמל של כל משאבה לערך נוכחי. בהנחת מחירי רכישה של $42,000$ ש"ח ל-A ו- $61,000$ ש"ח ל-B (כמשורטט באיור 27.2), עלות מחזור החיים המהוונת של A מגיעה לכ- $718,000$ ש"ח ושל B לכ- $627,000$ ש"ח. המשאבה ש"עלתה יותר" חוסכת כ- $90,000$ ש"ח לאורך חייה. שים לב שבשתייה החשמל הוא מעל 90% מה-LCC, בדיוק כפי שראינו באיור 27.1, ולכן הפרש הנצילות, ולא הפרש המחיר, הוא ששולט.



איור 27.2: עלות מצטברת לאורך הזמן, על נתוני דוגמה 27.1. המשאבה הזולה (זהב) מתחילה נמוך אך מטפסת תלול יותר, כי היא שורפת יותר חשמל בכל שנה. הרצועה הענברית היא חלון ההחזר: כעבור כ-1.7 שנה הקווים מצטלבים בנקודת האיזון (הנקודה האדומה), ומשם ואילך המשאבה היעילה (טורקיז) זולה יותר. הטריז הירוק שבין הקווים הוא החיסכון המצטבר של הבחירה הנכונה, והוא רק גדל משנה לשנה.

מבוסס על דוגמה 27.1 · ערכים נומינליים להמחשת ההצטלבות

SEC: מדד הכותרת שמחבר אנרגיה למים

כל החשבונות עד כה מבוססים בשקלים, אבל המהנדס צריך מדד פיזיקלי שמשווה בין מתקנים בגדלים שונים. המדד הזה הוא **צריכה סגולית** (*Specific Energy Consumption, SEC*): כמה קילוואט-שעה עולה לשאוב מטר מעוקב אחד. הוא מנרמל הכול, ומאפשר להעמיד תחנה גדולה ליד תחנה קטנה על אותו ציר.

נוסחה 27.3 · צריכה סגולית

$$SEC = P_1 / Q \quad [kWh/m^3]$$

P_1 ההספק החשמלי הנכנס [kW], מהקיר ועד המים (wire-to-water).

Q הספיקה $[m^3/h]$. שמירה על יחידות עקבית נותנת kWh/m^3 .

צורה נגזרת $SEC \approx H / (367 \cdot \eta/100)$. ה-SEC עולה עם העומד ויורד עם הנצילות.

ה-SEC הוא הגשר בין הפיזיקה לכסף: כפל SEC בתעריף החשמל נותן את **עלות שאיבת מטר מעוקב**, ה- m^3/m ששלהקוח באמת משלם על האנרגיה. אצל תאגיד מים, כל אגורה בעלות השאיבה למ"ק (SEC כפול התעריף) מוכפלת במיליוני מטרים מעוקבים בשנה, ולכן ירידה קטנה ב-SEC מתורגמת לסכומים גדולים. זהו המדד שעוקבים אחריו לאורך זמן כדי לתפוס בלאי לפני שהוא הופך לאי-עמידה רגולטורית (פרקים 24 ו-27).

טבלה 27.2 • SEC טיפוסי ועלות שאיבה (כלי עזר • תעריף מ"ג 0.40/kWh, ללא מע"מ)

מתקן	H עומד	נצילות	SEC	אנרגיה M^3
בוסטר יעיל	50 m	72%	0.189	0.076
בוסטר גבולי	50 m	55%	0.248	0.099
קידוח בריא	80 m	60%	0.363	0.145
קידוח שחוק	80 m	45%	0.484	0.194

תמחור החשמל: שני מקרים, לעולם לא לבלבל

זהו לב כל חישוב אנרגיה, והשגיאה הנפוצה ביותר. יש שני מקרים נפרדים לחלוטין, ולכל אחד כלל תמחור משלו.

כלל היסוד • שני מקרים

מקרה 1 • עלות בפועל = עובדה. מה שהלקוח באמת שילם, מתוך חשבונות חשמל אמיתיים. מציגים כפי שהוא, **ללא מע"מ** (התאגיד או האגודה מקזזים מע"מ תשומות). לעולם לא מחשבים, מעריכים או "מתקנים" סכום ששולם בפועל. פרקי צריכה, "כמה עלה החשמל", השוואות שנה מול שנה, כולם מהחשבונות.

מקרה 2 • אומדן קדימה = הערכה לפי מתח התחנה. חיסכון עתידי, ROI, תרחישי שדרוג. כאן משתמשים בתעריף האומדן לפי מתח התחנה: **מתח גבוה / מ"ג כ-0.40/kWh, מתח נמוך כ-0.50/kWh**, שניהם ללא מע"מ, ממוצע 24/7.

כל איור אנרגיה נושא הערה על המקור (בפועל: "מחשבונות, ללא מע"מ"; אומדן: "0.4/0.5" לפי מתח, ללא מע"מ"). הלקוח תמיד רואה ללא מע"מ.

מלכודת מתח נפוצה

"מתח גבוה" של תחנת מים בישראל הוא 6–33 kV, וזהו **medium** בלוגיקת התע"ז, תעריף 0.40 ש. אל תבלבל אותו עם "מתח עליון" (110 kV ומעלה, high), שכמעט לעולם אינו רלוונטי לתחנת שאיבה. כשלא יודעים את המתח, ברירת המחדל היא מתח נמוך, 0.50 ש. התעריפים מתעדכנים מדי שנה, ולכן לעולם לא מקבעים אותם בקוד אלא קוראים אותם ממקור אחד.

תע"ז: מתי, לא רק כמה

התעריף בישראל הוא **תעריף עומס זמן** (תע"ז / TOU), ולכן **מתי** שואבים משנה את העלות לא פחות מ**כמה** שואבים. שיא הקיץ יקר פי כמה משעת לילה. תחנה שיכולה לאגור מים בלילה הזול ולהמעיט בשאיבה בשיא היום חוסכת בלי לגעת בנצילות. כל חישוב אומדן 24/7 בספר משתמש בממוצע השנתי המשוקלל, אבל בעת תכנון הזזת עומסים מפרקים אותו לשיא ולשפל.

הזדמנויות החיסכון, מסודרות לפי החזר

ברגע שמבינים שהאנרגיה היא הסיפור, השאלה היא מאיפה מתחילים. חמש ההזדמנויות הבאות מסודרות בקירוב לפי כדאיות, מהמהלך עם ההחזר המהיר ביותר ועד לזה שדורש השקעה גדולה. כל אחת מהן מפותחת במלואה בפרק ייעודי בספר, וכאן היא ממוסגרת ככלי כלכלי.

1 ממיר תדר (VFD) לביקוש משתנה

חוק החזקה השלישית אומר שהספק יורד בחזקת שלוש מול המהירות, ולכן הורדה של 20% בספיקה חוסכת כ-49% בהספק כשעקום המערכת מאפשר זאת. ההזדמנות הגדולה ביותר ברוב התחנות עם ביקוש מתנודד. פרק 21.

2 שיפוץ או החלפה לפי נצילות נמדדת

החזרת נצילות שאבדה לבלאי טבעות שחיקה ומאיץ (פרק 5, פרק 9). ההחלטה מתקבלת לפי מגמת נצילות נמדדת ולא לפי גיל המשאבה. שיפוץ זול לרוב מחזיר את עצמו תוך פחות משנה כשהנצילות צנחה מתחת לסף.

3 חיתוך מאיץ להורדת עומד עודף

כשמשאבה מייצרת עומד קבוע גבוה מהדרוש ושסתום שונק את העודף, חיתוך מאיץ (פרק 14) מוריד את העומד אל נקודת העבודה ומבטל בזבז קבוע, בלי ממיר. החזר מהיר כשהמהלך מתאים.

4 מנוע בדרגת נצילות גבוהה (IE4/IE5)

שדרוג מנוע ישן בדרגת IE1 למנוע IE4 מוסיף כמה נקודות אחוז לנצילות הכוללת לאורך כל שעות הפעולה (פרק 19). כדאי במיוחד בתחנות עם שעות פעולה גבוהות מאוד.

5 איזון צי, הזזת עומסים ואגירה

חלוקת שעות בין משאבות לבלאי שווה, והזזת שאיבה לשעות התעו"ז הזולות (load-shift), עד אגירה בסוללות (BESS) שמנצלת את פער הקיץ של כ-1 kWh/ש. השקעה גדולה יותר, אך משתלמת בתחנות גדולות עם פער שיא-שפל חד.

איך ממינים בפועל

לכל הזדמנות מחשבים את אותה שלישייה: השקעה, חיסכון שנתי בחשמל (בתעריף אומדן לפי מתח), ו-NPV על פני 15 שנה. ממינים יורד לפי NPV, ומתחילים מלמעלה. כמעט תמיד ממיר תדר ושיקום נצילות עומדים בראש, כי הם משנים את צריכת האנרגיה הדומיננטית בהשקעה צנועה. שדרוג מנוע ואגירה באים אחריהם, ותלויים מאוד בשעות הפעולה ובפער התעו"ז של אותה תחנה.

אז מה? החשמל הוא הסיפור, וכל היתר הוא הערת שוליים. כ-85% מעלות מחזור החיים של משאבת מים הם חשמל, ולכן כל החלטה, רכישה, שיפוץ, ממיר או מנוע, נמדדת מול חיסכון החשמל המהוון, לא מול מחיר המדבקה. שני כללים שומרים על היושרה של החשבון: מפרידים תמיד בין עלות בפועל (עובדה, מהחשבונות, ללא מע"מ) לבין אומדן קדימה (לפי מתח, 0.40 ש"ח או 0.50 ש"ח, ללא מע"מ), וכל מספר נושא הערה על מקורו. כשמסדרים את ההזדמנויות לפי NPV, ממיר תדר ושיקום נצילות כמעט תמיד מובילים. זה הפרק שהופך את כל ההנדסה שלפניו לשורה תחתונה.

קישורים בספר

שרשרת הנצילות שכל החיסכון נשען עליה בפרק 4. סוגי המאיץ והגוף וטבעות השחיקה שמכתיבים נצילות ושיפוץ בפרק 5. חוקי הדמיות שמאחורי חיתוך מאיץ וממיר תדר בפרק 14. בחירת משאבה לנקודת עבודה ככלכלה, לא מחיר, בפרק 17. מנועים ודרגות נצילות בפרק 19. ממיר תדר במלואו בפרק 21. בדיקת נצילות שמזינה את כל המספרים האלה בפרק 25.

28 נוף התקנים והעתיד

The Standards Landscape & the Road Ahead

בקצרה

תקנים הם השפה המשותפת של עולם המשאבות. הם מגדירים **איך בודקים, איך מתכננים, מה מותר ומה הסף**. כשמתכננים, רוכשים או בודקים משאבה, תמיד מצטטים תקן. הכרת התקנים הנכונים, ולא רק שמותיהם, היא סימן ההיכר של מקצוען. הפרק ממפה את **נוף התקנים** הבינלאומי בטבלה אחת ברורה, את **הרגולציה הישראלית** של משרד האנרגיה (ספי TOE, חובת סקר, בדיקות נצילות וספי הנצילות), ואז מציץ אל **לאן התחום הולך**: תאום דיגיטלי, ניטור 24/7, חיזוי דעיכה בלמידת מכונה, אגירה והשבת אנרגיה. זהו גם פרק הסיום של הספר.

נוף התקנים: מי קובע מה

אף תקן בודד אינו "תקן המשאבות". במקום זה יש משפחה של תקנים, וכל אחד עונה על שאלה אחרת: איך בודקים ביצועים, איך מתכננים מכנית, אילו ממדים, ומה נצילות המינימום המותרת.

שלושה גופים מובילים את הזירה. **ארגון התקינה הבינלאומי (ISO)** קובע את תקני הבדיקה והתכן הכלליים. **מכון ההידראוליקה האמריקאי (Hydraulic Institute, HI / ANSI)** קובע את הנומנקלטורה, ההתקנה והמידות בארה"ב. **והאיחוד האירופי (EU ErP)** קובע, דרך רגולציה מחייבת, את רף הנצילות המינימלי לשוק. לצדן, API 610 שולט בעולם הנפט והגז. נמפה את כולם.

טבלה 28.1 • נוף התקנים המרכזיים בעולם המשאבות הצנטריפוגליות

תקן	נושא	מה הוא קובע	מתי חל
ISO 9906	בדיקות ביצועים	שיטת בדיקת קבלה הידראולית ורצועות סיבולת בשלוש דרגות (1 / 2 / 3) על Q, H, η, P. תקן הליבה של פרק 25.	כל בדיקת נצילות או קבלה. דרגה 2 היא תקן השדה בישראל.
ISO 5199	תכן מכני	דרישות תכן מכני למשאבות תהליך: ציר, מסבים, אטימה, רעידות, מאמצי צנרת. המקבילה ה"רכה" יותר ל-API 610.	משאבות תהליך תעשייתיות בעומס בינוני (כימיה, מים, תהליך).
ISO 2858	ממדים	ממדי התקנה סטנדרטיים למשאבות end-suction (קוטרי אוגן, גובה ציר, מרחקי ברגים). מבטיח החלפיות בין יצרנים.	רכש והחלפה: משאבה מיצרן אחר נכנסת לאותו בסיס וצנרת.
EN 733 (DIN 24255)	ממדים	הגרסה האירופית: משאבות end-suction חד-שלביות עד 10 bar, ממדים ונקודות חיבור מתוקננים. סוס העבודה של מים נקיים.	משאבות מים אזרחיות באירופה ובישראל. נפוץ ביותר בשטח.
API 610	תכן כבד	תקן הנפט, הגז והפטרוכימיה. דרישות מחמירות, חיי תכן 20 שנה ו-3 שנות פעולה רצופה בין שיפוצים (במהדורה ה-12, 2021, הוחלף הערך הקבוע בחובת הצהרה על רכיבים בעלי אורך חיים סופי). כולל קטלוג טיפוסים (OH / BB / VS).	זיקוק, פטרוכימיה, נוזלים מסוכנים או חמים בלחץ גבוה.
HI / ANSI 14.x ASME + B73.1	נומנקלטורה והתקנה	תקני Hydraulic Institute: הגדרות, תכן, התקנה, אטימה ו-NPSH. B73.1 הוא תקן הממדים האמריקאי המקביל ל-ISO 2858.	שוק צפון אמריקה. מקור המרווחים והכללים שמצוטטים בספר זה.
EU ErP / MEI Reg. 547/2012	נצילות מינימום	מדד נצילות מינימלי (<i>Minimum Efficiency Index, MEI</i>) חוסם את ייצור המשאבות הגרועות. $MEI \geq 0.40$ מסיר את 40% הגרועות; $MEI \geq 0.70$ הוא הטוב ביותר הזמין.	חל על משאבות מים חדשות הנמכרות באיחוד (וכך גם בישראל בפועל).

תקן בדיקה מול תקן תכן מול תקן ממדים

קל להתבלבל. **תקן בדיקה** (ISO 9906) אומר איך מודדים ומה הסיבולת, אבל לא איך לבנות. **תקן תכן** (API 610, ISO 5199) אומר איך לבנות חזק ובטוח, אבל לא איך למדוד. **תקן ממדים** (B73.1, EN 733, ISO 2858) אומר איפה החורים והאוגנים, כדי שמשאבה של יצרן א' תיכנס בדיוק במקום של יצרן ב'. שלושתם משלימים, לא מתחרים.

MEI: איך אירופה מנקה את השוק מלמטה

רגולציית ErP (Reg. 547/2012) לא מכתיבה נצילות יחידה לכל משאבה, כי משאבה קטנה ומשאבה ענקית לא יכולות להגיע לאותו מספר (זוכרים את גבול המהירות הסגולית מפרק 5). במקום זה היא מגדירה את MEI, מדד בין 0 ל-1 שמתאר **איפה המשאבה עומדת ביחס לכלל השוק**. $MEI = 0.40$ פירושו "טובה יותר מ-40% הגרועות". התקנה אסרה על מכירת משאבות מתחת ל-0.40 MEI, ובכך חתכה את הזנב הבזבזני של השוק בלי לדרוש מהפך הנדסי.

טבלה 28.2 • רמות MEI ומשפחות המשאבות שה-ErP חלה עליהן (כלי עזר)

MEI	משמעות	טיפוסי המשאבה שברגולציה
≥ 0.10	סף מינימום ראשוני (שלב ביניים, פג)	end-suction · ESOB על בסיס משלו
≥ 0.40	סף מחייב היום • מסיר את 40% הגרועות	end-suction close-coupled · ESCC close-coupled inline · ESCCi
≥ 0.50	נצילות טובה • מומלץ ברכש מים אזרחי	MS-V • רב-שלבית אנכית (עד $100 \text{ m}^3/\text{h}$, עד 25 bar)
≥ 0.70	הטוב ביותר הזמין בשוק (best-available)	MSS • טבולה רב-שלבית (קידוח)

איך זה נכנס למפרט רכש

כשכותבים מפרט רכש למשאבת מים חדשה, אל תסתפקו ב"לפי EN 733". הוסיפו שורה אחת: **"MEI ≥ 0.50 (עדיף 0.70)"**. זו הדרך הפשוטה ביותר לחסום, כבר בכתב, את המשאבה הזולה והבזבזנית, בלי לנהל ויכוח הנדסי מול הספק. עלות מחזור החיים (פרק 27) תחזיר את הפרש המחיר תוך שנים בודדות.

הרגולציה הישראלית: משרד האנרגיה

מעבר לתקנים הבינלאומיים, בישראל יש שכבת חובות ייחודית מטעם **משרד האנרגיה**. היא בנויה משני ספיי טון שווה ערך נפט (TOE) שנתיים, שכל אחד מהם מפעיל חובה אחרת. ה-TOE הוא יחידת אנרגיה מנורמלת: ככל שמתקן צורך יותר חשמל, ה-TOE השנתי שלו גבוה יותר, ובסוף מסוים הוא נכנס לרגולציה.

$$TOE_{annual} = kWh_{annual} \times k$$

kWh	צריכת החשמל השנתית של המתקן [kWh/yr].
k	מקדם ההמרה. שתי דרישות, שני מקדמים שונים, אסור לערבב: לסקר אנרגיה $k = 0.00021$ (תשע"ט-2018); לממונה אנרגיה $k = 0.00026$ (תשנ"ד-1993).
TOE	התוצאה, בטון שווה ערך נפט לשנה. משווים אותה לספים שבטבלה 28.3.

טבלה 28.3 • שתי חובות הרגולציה הישראליות במשאבות מים

חובה	תקנה	סף TOE	מה היא מחייבת
ממונה אנרגיה	תשנ"ד-1993	> 300 $k = 0.00026$	מינוי ממונה אנרגיה מוסמך, דיווח שנתי וביצוע ייעול שוטף. מקדם ההמרה ההיסטורי הגבוה יותר.
סקר אנרגיה (גוף מבוקר)	תשע"ט-2018	$> 1,250$ $k = 0.00021$	סקר אנרגיה מקיף בידי סוקר מוסמך כל 4.5 שנים, על כל צרכני האנרגיה, כולל המשאבות.

שני המקדמים, אותה מילה

גם "ממונה" וגם "סקר" מודדים ב-TOE, אבל המקדם שונה כי הם משתי תקנות שונות. **סקר אנרגיה** (תשע"ט) משתמש ב-0.00021 מול סף 1,250; **ממונה אנרגיה** (תשנ"ד) משתמש ב-0.00026 מול סף 300. החלפה ביניהם תיתן תשובה שגויה לשאלה האם המתקן בכלל ברגולציה. בדקו תמיד לפי איזו דרישה אתם מחשבים.

חובת הנצילות: הספים והבדיקה החוזרת

הרובד המעשי שנוגע ישירות למשאבות הוא **חובת בדיקת הנצילות**. כל משאבה במתקן מבוקר נבדקת לפי ISO 9906 דרגה 2, והנצילות הכוללת שלה (wire-to-water), לא נצילות המשאבה בלבד, (ראו פרק 4) חייבת לעבור סף שתלוי בסוג המתקן. אם היא לא עוברת, צריך לשפץ, לחתוך מאיץ או להחליף, ואז לבדוק שוב.

טבלה 28.4 • ספי נצילות כוללת ובדיקה חוזרת (כלי עזר)

סוג מתקן	סף נצילות כוללת	בדיקה חוזרת
משאבה משטחית / בוסטר	65%	
משאבת בור / טורבינה	55%	כל 30 חודשים, או כל 7,500 שעות פעולה, המוקדם מביניהם
משאבת ביוב	50%	

אגודת מים מפעילה תחנת שאיבה אזורית. נתון מהחשבונות השנתיים: צריכת החשמל הכוללת היא 7,100,000 kWh בשנה. נבדוק אם האגודה חוצה את סף הגוף המבוקר (סקר אנרגיה) ואת סף הממונה.

$$k_{\text{survey}} = 0.00021 \text{ (תשע"ט)} \quad k_{\text{memune}} = 0.00026 \text{ (תשנ"ד)} \quad kWh = 7,100,000 \text{ kWh/yr}$$

1 נחשב TOE לפי מקדם הסקר (נוסחה 28.1):

$$TOE = 7,100,000 \times 0.00021 = 1,491 \text{ TOE/yr}$$

2 נשווה לסף הגוף המבוקר: חייב בסקר אנרגיה $1,491 > 1,250$

3 נחשב TOE לפי מקדם הממונה ונשווה לסף שלו:

$$7,100,000 \times 0.00026 = 1,846 > 300 \rightarrow \text{חייב בממונה}$$

תוצאה: **1,491 TOE** לפי מקדם הסקר. האגודה היא **גוף מבוקר** ומחויבת גם בסקר אנרגיה כל 4.5 שנים וגם במימון ממונה אנרגיה. **כל משאבה בתחנה** נכנסת לחובת בדיקת נצילות כל 30 חודשים מול ספי טבלה 28.4.

למה זה לא רק בירוקרטיה. אותה תחנה, אם נצילותה הממוצעת 52% במקום 62%, מבזבזת בערך 1,150,000 kWh בשנה. בתעריף מתח גבוה של 0.40 ש"ל לקוט"ש (ללא מע"מ, פרק 27), זה כ-460,000 ש"ל בשנה. הרגולציה רק מאלצת למדוד את מה שכבר עולה כסף.

הסף נמדד בנצילות הכוללת, לא בנצילות המשאבה

זו הטעות הרגולטורית הנפוצה ביותר, וחוזרים עליה כי היא קריטית. הסף של 65% / 55% חל על הנצילות הכוללת מהחשמל למים, שכוללת גם את הפסדי המנוע וגם את הפסדי ה-VFD. אסור לדווח נצילות משאבה (שתמיד גבוהה יותר) במקום נצילות כוללת. מנוע IE1 ישן או ממיר ישן ייספרו נגד המתקן, וזה בדיוק העניין: זו האנרגיה שהלקוח משלם עליה בפועל (פרק 4).

לאן הולך התחום: חמש מהפכות

עולם המשאבות, שמרני ויציב במשך עשורים, עובר עכשיו את השינוי הגדול ביותר מאז ה-VFD. כל הכיוונים האלה כבר קיימים בשטח, וחלקם יהיו סטנדרט בתוך שנים ספורות. הם בנויים על אותם עקרונות שלמדנו בספר, רק עם שכבת חיישנים, נתונים ובינה.

תעו"ז

פער שיא-שפל
מנוע האגירה והעומסים

137

בדיקות ישראליות
אמיתיות
לאימון מודל החיזוי

~1.9%

דעיכת נצילות שנתית
חציונית, נמדדה בשדה

24/7

ניטור רציף
במקום בדיקה תקופתית

1 • תאום דיגיטלי של תחנת שאיבה

התאום הדיגיטלי (digital twin) הוא מודל חי וממוחשב של התחנה: עקומות המשאבות, עקום המערכת, מפלסי המאגרים והתעריף השעתי, כולם רצים יחד בזמן אמת. הוא מוזן מחיישני לחץ, זרם, ספיקה ורעידות, ומריץ את אותן נוסחאות מהספר ($Ph = Q \cdot H / 367$, חוקי הדמיות, חיתוך עקומים) כדי לחזות מה יקרה לפני שמשנים משהו בשטח. מנהל יכול לשאול "מה אם אעצור משאבה 3 ואאיץ את 1 ל-47 Hz", ולקבל תשובה אנרגטית מיד.

2 • ניטור מצב ו-IoT מסביב לשעון

במקום בדיקת נצילות אחת כל 30 חודשים, חיישנים זולים מודדים רעידות, טמפרטורת מסבים ו- P_r ברציפות (פרק 24). המגמה חשובה יותר מהערך הבודד: עלייה איטית ברעידות בתדר מסוים מסגירה בלאי מסב או תחילת קוויטציה (פרק 15) חודשים לפני הכשל. זה המעבר מאחזקת שבר ואחזקה מונעת לפי לוח זמנים אל אחזקה חזויה לפי מצב אמיתי.

חיזוי דעיכה בלמידת מכונה

מודל שלמד מ-137 בדיקות ישראליות אמיתיות מצא משהו לא טריוויאלי: **גיל ושעות לבדם מנבאים רק כ-15% מהנצילות** (גיל לבד $R^2 \approx 0.04$). אי אפשר לקבוע שיפוך לפי "כל X שנים". הגיל קובע מתילבדוק; המדידה קובעת מתילשפץ.

תאום דיגיטלי וניטור 24/7

מודל חי של תחנת השאיבה, מוזן מחיישני לחץ, זרם ורעידות, מריץ את נוסחאות הספר בזמן אמת ומתריע על סטייה לפני שהיא הופכת לכשל. ניטור רציף מחליף את צילום הרגע התקופתי, ומגלה דעיכה הדרגתית שבדיקה אחת לשנתיים מפספסת.

3 • חיזוי דעיכה: מה הנתונים האמיתיים מלמדים

חיתוך נתונים של בדיקות אמיתיות מספר את הסיפור החשוב מכולם. דעיכת הנצילות הטבעית הנמדדת היא בערך 1.9% לשנה בחציון (במקרים הגרועים עד 3.9%), **פי 2.4 מההנחה השמרנית של 0.8%** שמודלים פשוטים מניחים. כלומר משאבות מתבלות מהר משחושבים, אבל לא לפי שעון אחיד. מודל למידת מכונה לא מחליף את הבדיקה, הוא מתעדף אותה: הוא מצביע על המשאבות שהכי כדאי למדוד עכשיו, ומשאיר את הבריאות לאחר כך.

מסגרת תלת-שכבתית לקבלת החלטה

- **מתי לבדוק** - לפי שעות פעולה וגיל. אלה קובעים תדירות בדיקה, לא שיפוך.
- **מתי לשפץ** - לפי נצילות נמדדת ומגמה. דעיכה מעל כ-2.5% לשנה, או חצייה של הסף, מפעילה החלטה.
- **כמה להשקיע** - לפי NPV (פרק 27). אופטימום השיפוך זז עם גודל המשאבה: בערך 7 שנים ל-250 kW ועד 12 שנים ל-22 kW.

4 • CFD: לראות את הזרימה לפני שיוצקים מתכת

דינמיקת זורמים חישובית (CFD) פותרת את משוואות הזרימה בתוך המאיץ וגוף המשאבה על רשת של אלפי תאים, ומציירת את שדה המהירות והלחץ. כך מזהים אזורי הפרדת זרימה, מערבולות ונקודות לחץ נמוך שעלולות לקוות, עוד לפני שיוצקים אב-טיפוס. עבור המנהל בשטח, ה-CFD הוא לרוב כלי של היצרן, אבל ההבנה למה מאיץ מסוים נצול יותר, ולמה קוויטציה מתחילה דווקא בגב הלהב, מגיעה משם.

5 • אנרגיה כשירות, אגירה ומשאבה כטורבינה

שלושה מודלים כלכליים-אנרגטיים חדשים סוגרים את המעגל. ב. **אנרגיה כשירות (Energy-as-a-Service)** ספק מתקין VFD, מנוע יעיל או בקרה, ונפרע מתוך החיסכון עצמו, בלי שהלקוח מוציא הון מראש. **הזזת עומסים ואגירה (load-shift + BESS)** מנצלת את הפרש המחיר בין שיא לשפל בתע"ז (פרק 27): שואבים למאגר בשעות הזולות, ואף אוגרים בסוללות. **והמשאבה כטורבינה (Pump-as-Turbine, PAT)** מנצלת מפלי לחץ עודפים: במקום לשרוף לחץ בשסתום מווסת, מריצים משאבה רגילה הפוך כטורבינה ומשיבים חשמל לרשת.

משאבה כטורבינה (PAT)

היכן שיש מפל לחץ עודף שמבזבז בשסתום, משאבה צנטריפוגלית סטנדרטית יכולה לעבוד הפוך ולהשיב אנרגיה במקום לשרוף אותה. פתרון זול יחסית, כי משתמשים בחומרה מדף קיימת. נפוץ בקווי הולכה הרריים ובכניסה למאגרים גבוהים.

אגירה והזזת עומסים

שאיבה לשעות חשמל זול לפי תע"ז, ובהמשך אגירה בסוללות (BESS). הפרש המחיר בין שיא לשפל הוא מנוע חיסכון אמיתי, ובמערכות מים הוא "חינמי" כי המאגר עצמו הוא הסוללה. גודל החיסכון נשען ישירות על פער המחיר שיא-שפל בתע"ז (פרק 27).

קישורים בספר

ספי הנצילות והנצילות הכוללת מפותחים בפרק 4. דרגות הבדיקה של ISO 9906 ורצועות הסיבולת הן לב פרק 25. הכלכלה שמאחורי כל ההזדמנויות, NPV, LCC, תמחור החשמל הנכון והזזת עומסים, נמצאת בפרק 27 שקדם לפרק זה. חוק החזקה השלישית שמניע את חיסכון ה-VFD וה-BESS בפרק 14. ניטור הרעידות שמזין את החיזוי בפרק 24.

סוף דבר: הידע הוא המנוף

הספר הזה נפתח בעיקרון אחד פשוט: מאיץ שמסתובב זורק מים החוצה ומעניק להם אנרגיה. מאותו רעיון בודד בנינו, פרק אחר פרק, את כל מה שצריך כדי להבין כל משאבה צנטריפוגלית בעולם. עקומות מאפיין, NPSH וקוויטציה, חוקי דמיות, בחירה לנקודת עבודה, אטימה ומסבים, נצילות ובדיקתה, אחזקה, כלכלה, ועכשיו תקנים ועתיד. אלה לא נושאים נפרדים אלא שפה אחת.

בישראל יש עשרות אלפי משאבות מים, ורבות מהן עובדות הרבה מתחת לפוטנציאל שלהן בשקט, בלי שאיש ירגיש, כי בזבוז אנרגיה לא משמיע רעש. המנוף היחיד שמזיז את המספר

הזה הוא **ידע**: היכולת להסתכל על משאבה, לקרוא את העקום, לחשב את הנצילות, ולדעת אם היא בריאה או מבזבזת. זו הייתה המטרה של הספר מהעמוד הראשון.

סוף דבר תקן אומר מה הסף, אבל ידע אומר איך לעבור אותו. עברנו דרך ארוכה, מהעיקרון של מאיץ שזורק מים, דרך העקומות, ה-NPSH, הבחירה, הנצילות והאחזקה, ועד הכלכלה, הרגולציה והעתיד. עכשיו יש בידך מה שלוקח שנים בשטח לצבור: לראות כל משאבה ולהבין אותה. כל אחוז נצילות שתחזיר הוא חשמל שלא נשרף, כסף שנחסך, ומים שזורמים בעלות נמוכה יותר. זו הסיבה שכתבתי את הספר. עכשיו זה בידיים שלך. בהצלחה.

יהודה בוז'ו

מהנדס מים ואנרגיה · water-energy.co.il

משאבות צנטריפוגליות · המדריך ההנדסי המלא

A-F

כלי עזר

נספחים וטבלאות עזר

Appendices & Reference Tables

טבלאות המרת יחידות	A
תכונות מים מול טמפרטורה	B
מקדמי חיכוך ואיבודי אביזרים	C
דף נוסחאות מרוכז	D
מילון מונחים עברי-אנגלי	E
רשימות תיוג	F

טבלאות המרת יחידות

Unit Conversion Tables

בקצרה

הנספח הזה הוא טבלת ההמרות שתחזרו אליה בכל חישוב שדה. כל טבלה בנויה באותו הגיון: כל שורה היא יחידה אחת, וכל עמודה היא הערך שלה ביחידות האחרות. כדי להמיר, אתרו את שורת היחידה שיש לכם, ולכו אל עמודת היחידה שאליה תרצו להגיע. הערכים מעוגלים לארבע-חמש ספרות משמעותיות, מספיק לכל עבודה הנדסית. בסוף הנספח מרוכזים מקדמי ההמרה המדויקים לחישוב עדין. כל המספרים מבוססי SI, התקן הבינלאומי שמלווה את הספר כולו.

שלוש המרות לזכור בעל פה

$1 \text{ L/s} = 3.6 \text{ m}^3/\text{h}$ (פשוט כפל ב-3.6). $10 \text{ m} \approx 1 \text{ bar}$ (עומד מים מול לחץ). $1 \text{ kW} \approx 1.34 \text{ hp}$ (הספק מול כוח-סוס). עם השלוש האלה לבד אפשר לעבור את רוב חישובי השטח בלי טבלה.

לחץ ועומד • Pressure & Head

מהנדסי משאבות חיים בעולם של עומד (מטרי מים), בעוד שמדי לחץ בשטח מציגים בר או psi. הטבלה הזו מגשרת בין השפות.

טבלה A.1 • המרת לחץ ועומד (pressure & head)

יחידה	BAR	KPA	MH ₂ O (M)	PSI	ATM	MBAR
bar 1	1	100	10.197	14.504	0.9869	1000
kPa 1	0.01000	1	0.1020	0.1450	0.00987	10
mH ₂ O 1	0.009807	9.807	1	1.4223	0.09678	98.07
psi 1	0.06895	6.895	0.7031	1	0.06805	68.95
atm 1	1.0133	101.33	10.332	14.696	1	1013.3
mbar 1	0.00100	0.100	0.01020	0.01450	0.000987	1

למה ל- mH_2O שתי גרסאות

מטר עמוד מים תלוי בצפיפות וב- g . הטבלה משתמשת במים ב- 4°C ו- $g = 9.80665 \text{ m/s}^2$, ולכן $1 \text{ mH}_2\text{O} = 9.807 \text{ kPa}$. בכלל האצבע בשטח מעגלים ל- 10 kPa (כלומר $1 \text{ bar} \approx 10 \text{ m}$). ההפרש קטן מ-2 אחוז, זניח לבדיקת שדה אך לא לחישוב NPSH עדין, שם משאירים את 10.197.

ספיקה • Flow Rate

ספיקה היא הגודל שמתחלף בין יחידות לעתים הקרובות ביותר. אירופה עובדת ב- m^3/h , אנשי שדה ב- L/s , וקטלוגים אמריקאים ב- gpm . שימו לב להבדל בין גלון אמריקאי לגלון אנגלי.

טבלה A.2 • המרת ספיקה (flow rate)

יחידה	m^3/h	L/S	L/MIN	m^3/s	US GPM	UK GPM
m^3/h 1	1	0.2778	16.667	0.000278	4.4029	3.6662
L/s 1	3.600	1	60	0.00100	15.850	13.198
L/min 1	0.0600	0.01667	1	1.67e-5	0.2642	0.2200
m^3/s 1	3600	1000	60000	1	15850	13198
US gpm 1	0.2271	0.06309	3.7854	6.31e-5	1	0.8327
UK gpm 1	0.2728	0.07577	4.5461	7.58e-5	1.2009	1

מלכודת הגלונים

גלון אמריקאי ($\text{US gallon} = 3.7854 \text{ L}$) קטן מגלון אנגלי-קיסרי ($\text{UK gallon} = 4.5461 \text{ L}$) בכ-17 אחוז (הגלון האנגלי גדול ממנו בכ-20 אחוז). קטלוג אמריקאי תמיד מציין gpm ומתכוון לגלון אמריקאי. אם תטעו ותניחו גלון אנגלי, תתכננו משאבה גדולה ב-20 אחוז מהנדרש. בדקו תמיד את מקור הקטלוג.

הספק • Power

כוח-סוס בא בשתי גרסאות שונות. ה"מטרי" (מטרי hp , PS) שגור באירופה ובמנועים, ה"אימפריאלי" (hp) נפוץ בקטלוגים אמריקאים. ההבדל קטן אך אמיתי.

טבלה A.3 • המרת הספק (power)

W	HP (IMPERIAL)	HP (METRIC/PS)	KW	יחידה
1000	1.3410	1.3596	1	kW 1
735.5	0.9863	1	0.7355	hp 1 (מטרי, PS)
745.7	1	1.0139	0.7457	hp 1 (אימפריאלי)
1	0.001341	0.001360	0.00100	W 1

איזה כוח-סוס על המנוע

שלט מנוע אירופי נוקב בהספק ב-kW ולעתים מוסיף PS (כוח-סוס מטרי, 735.5 W). קטלוג אמריקאי נוקב ב-hp אימפריאלי (745.7 W). ההפרש כ-1.4 אחוז, מספיק כדי לבלבל בבחירת מנוע על הגבול. כלל אצבע בריא: $1 \text{ kW} \approx 1.34 \text{ hp}$, ובכיוון ההפוך $2.2 \text{ kW} \approx 3 \text{ hp}$.

אורך ועומד • Length & Head

עומד נמדד במטרים, אך קטלוגים וציוד אמריקאי נוקבים ברגל (ft). זו ההמרה הפשוטה ביותר בנספח, אך גם זו שמתפספסת הכי הרבה.

טבלה A.4 • המרת אורך ועומד (length / head)

MM	IN	CM	FT	M	יחידה
1000	39.370	100	3.2808	1	m 1
304.8	12	30.48	1	0.3048	ft 1
10	0.3937	1	0.03281	0.01000	cm 1
25.40	1	2.540	0.08333	0.02540	in 1
1	0.03937	0.100	0.003281	0.00100	mm 1

מהירות • Velocity

מהירות זרימה בצנרת היא גודל מפתח לחישוב איבודים ולבחירת קוטר. מקובל לעצב צנרת יניקה ל-1.5 m/s–1 וצנרת סניקה ל-2–3 m/s.

טבלה A.5 • המרת מהירות (velocity)

יחידה	M/S	FT/S	KM/H	M/MIN
m/s 1	1	3.2808	3.600	60
ft/s 1	0.3048	1	1.0973	18.29
km/h 1	0.2778	0.9113	1	16.67
m/min 1	0.01667	0.05468	0.0600	1

צמיגות • Viscosity

צמיגות באה בשני טעמים. דינמית μ מודדת התנגדות לגזירה, קינמטית ν $\nu = \mu/\rho$ מנרמלת אותה לצפיפות. הנוסחאות ההידראוליות בספר משתמשות בקינמטית.

טבלה A.6 א • צמיגות דינמית (μ , dynamic viscosity)

יחידה	PA·S	CP	MPA·S	P (POISE)
Pa·s 1	1	1000	1000	10
cP 1	0.00100	1	1	0.0100
mPa·s 1	0.00100	1	1	0.0100
P 1	0.100	100	100	1

טבלה A.6 ב • צמיגות קינמטית (ν , kinematic viscosity)

יחידה	M²/S	CST	MM²/S	ST (STOKES)
m²/s 1	1	1.0e6	1.0e6	1.0e4
cSt 1	1.0e-6	1	1	0.0100
mm²/s 1	1.0e-6	1	1	0.0100
St 1	1.0e-4	100	100	1

למים תזכרו מספר אחד

מים ב-20°C: צמיגות דינמית $\mu \approx 1.0 \text{ cP} = 0.001 \text{ Pa}\cdot\text{s}$, צמיגות קינמטית $\nu \approx 1.0 \text{ cSt} = 1.0 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$. נוח לזכור ששתייהן בערך "אחד" ביחידות השימושיות (cP ו-cSt), כי צפיפות המים קרובה ל- 1000 kg/m^3 ולכן $\nu \approx \mu$ בקירוב נוח. שמן הידראולי טיפוסי הוא $\sim 46 \text{ cSt}$, כלומר פי 46 צמיג ממים.

טמפרטורה • Temperature

טמפרטורה היא ההמרה היחידה בנספח שאינה כפול פשוט במקדם, אלא נוסחה (יש היסט אפס). זכרו שטמפרטורת הנזל משנה את לחץ האדים, ולכן את NPSH הזמין (פרק 15).

נוסחה A.1 • המרת טמפרטורה

$$^{\circ}\text{F} = ^{\circ}\text{C} \times 9/5 + 32 \quad | \quad ^{\circ}\text{C} = (^{\circ}\text{F} - 32) \times 5/9 \quad | \quad \text{K} = ^{\circ}\text{C} + 273.15$$

°C	צלזיוס (Celsius). סולם העבודה ההנדסי. נקודת קיפאון המים 0, רתיחה 100.
°F	פרנהייט (Fahrenheit). נפוץ בארה"ב. קיפאון 32, רתיחה 212.
K	קלווין (Kelvin), הסולם המוחלט. אפס מוחלט °C -273.15 = 0 K. ללא סימן מעלה.

טבלה A.7 • נקודות טמפרטורה שכיחות (reference points)

מה	°C	°F	K
קיפאון מים	0	32	273.15
מים קרים טיפוסיים	10	50	283.15
טמפרטורת תקן (20°C)	20	68	293.15
מים פושרים	25	77	298.15
גוף האדם	37	98.6	310.15
מערכת קירור חמה	60	140	333.15
רתיחת מים (1 atm)	100	212	373.15

אנרגיה • Energy

חשבונות חשמל מדברים kWh, פיזיקה מדברת joule, וחימום מדבר kcal או BTU. בחישובי צריכה ועלות אנרגיה של תחנת שאיבה תזדקקו לכולן.

WH	BTU	KCAL	MJ	KWH	יחידה
1000	3412.1	859.85	3.600	1	kWh 1
277.78	947.82	238.85	1	0.2778	MJ 1
1.163	3.9683	1	0.004187	0.001163	kcal 1
0.2931	1	0.2520	0.001055	0.000293	BTU 1
1	3.4121	0.85985	0.003600	0.00100	Wh 1

מ-kWh לעלות

ביחידת האנרגיה הרלוונטית לשטח, 1 kWh שווה ל-3.6 MJ בדיוק. בחישוב צריכת תחנה: ההספק החשמלי הנשאב מהרשת (P_1 בקילו-ואט) כפול שעות הפעולה נותן kWh, ואלה כפול תעריף החשמל נותנים שקלים. תמיד הציגו עלות אנרגיה ללא מע"מ, לפי מקדם המתח של התחנה.

מקדמי המרה מהירים • Quick Multipliers

לחישוב ביד או בגיליון, אלה מקדמי הכפל השימושיים הנפוצים ביותר, מעוגלים לארבע-חמש ספרות. כדי להמיר, הכפילו במקדם. כדי לחזור אחורה, חלקו בו.

טבלה A.9 • מקדמי כפל שימושיים (working multipliers)

מ-	אל-	-הכפל ב	תחום
L/s	m ³ /h	3.600	ספיקה
m ³ /h	L/s	0.2778	ספיקה
m ³ /h	US gpm	4.4029	ספיקה
US gpm	m ³ /h	0.2271	ספיקה
bar	m	10.197	לחץ ↔ עומד
m	bar	0.09807	עומד ↔ לחץ
bar	psi	14.504	לחץ
psi	bar	0.06895	לחץ
kW	hp (imp)	1.3410	הספק
hp (imp)	kW	0.7457	הספק
kW	PS	1.3596	הספק (מטרי)

מ-	אל-	הכפל ב	תחום
m	ft	3.2808	אורך / עומד
ft	m	0.3048	אורך / עומד
kWh	MJ	3.600	אנרגיה
kWh	kcal	859.85	אנרגיה
cSt	m ² /s	1.0e-6	צמיגות קינמטית
cP	Pa·s	1.0e-3	צמיגות דינמית

אז מה? טעות יחידות היא הטעות ההנדסית היקרה ביותר. משאבה שתוכננה ב-gpm אנגלי במקום אמריקאי, או עומד שחושב ב-psi במקום בר, יוצרים פער של עשרות אחוזים שמתגלה רק כשהמתקן כבר באדמה. סמנו את הנספח הזה, וכשמספר נראה מוזר, חזרו אליו לפני שאתם חותמים על המפרט.

B תכונות מים מול טמפרטורה

Water Properties vs Temperature

תכונות המים אינן קבועות. הן משתנות עם הטמפרטורה, ושינוי קטן לכאורה משנה את חישובי המשאבה. הנספח הזה הוא טבלת העזר המרכזית שאליה חוזרים בכל חישוב NPSH, איבודי חיכוך והמרת לחץ-עומד.

הטבלה המרכזית B.1 נותנת חמש תכונות של **מים נקיים** בלחץ אטמוספרי, מ-0°C ועד 100°C: צפיפות, לחץ אדים (גם ב-kPa וגם בעמוד מים), צמיגות דינמית, צמיגות קינמטית וחום סגולי. שלוש שורות מסומנות במיוחד: 4°C שבו הצפיפות מרבית, 20°C שהוא טמפרטורת הייחוס ההנדסית, ו-100°C שבו לחץ האדים שווה ללחץ האטמוספרי והמים רותחים. הערכים תואמים את טבלאות הקיטור התקניות (IAPWS-IF97) ואת **ארגז הכלים ההנדסי (Engineering ToolBox)**.

טבלה B.1 • תכונות מים נקיים מול טמפרטורה (לחץ אטמוספרי)

חום סגולי C_p (KJ/KG·K)	צמיגות קינ N ($10^{-6} \text{ M}^2/\text{S} = \text{CST}$)	צמיגות דינ M (MPA·S = CP)	P_v (MH ₂ O)	לחץ אדים P_v (KPA)	צפיפות P (KG/M ³)	ד (°C)
4.217	1.792	1.792	0.062	0.61	999.8	0
4.214	1.731	1.731	0.067	0.66	999.9	1
4.205	1.567	1.567	0.083	0.81	1000.0	4
4.202	1.519	1.519	0.089	0.87	1000.0	5
4.192	1.307	1.307	0.125	1.23	999.7	10
4.186	1.139	1.138	0.174	1.71	999.1	15
4.182	1.004	1.002	0.239	2.34	998.2	20
4.180	0.893	0.890	0.323	3.17	997.0	25
4.178	0.801	0.798	0.433	4.25	995.7	30
4.178	0.724	0.719	0.574	5.63	994.0	35
4.179	0.658	0.653	0.752	7.38	992.2	40
4.181	0.602	0.596	0.977	9.59	990.2	45
4.182	0.554	0.547	1.259	12.35	988.0	50
4.184	0.511	0.504	1.606	15.76	985.7	55

חום סגולי C_p (KJ/KG·K)	צמיגות קיני N ($10^{-6} \text{ M}^2/\text{S} = \text{CST}$)	צמיגות דיני M ($\text{MPA} \cdot \text{S} = \text{CP}$)	P_v (MH_2O)	לחץ אדים P_v (KPA)	צפיפות P (KG/M^3)	T (°C)
4.185	0.474	0.466	2.033	19.95	983.2	60
4.187	0.442	0.434	2.552	25.04	980.6	65
4.190	0.413	0.404	3.180	31.20	977.8	70
4.193	0.388	0.378	3.934	38.60	974.8	75
4.197	0.365	0.355	4.830	47.39	971.8	80
4.201	0.345	0.334	5.895	57.83	968.6	85
4.205	0.326	0.315	7.150	70.14	965.3	90
4.210	0.310	0.298	8.619	84.55	961.9	95
4.215	0.297	0.285	9.965	97.76	959.1	99
4.217	0.294	0.282	10.330	101.33	958.4	100

המרת לחץ אדים לעמוד מים: $m = \text{kPa} / (\rho \cdot g) \approx \text{kPa} / 9.81$ (במים קרים). מעל כ-50°C השתמשו בצפיפות בפועל מהטבלה: $m = \text{kPa} / (\rho(T) \cdot g / 1000)$; בעמודה כאן הערכים חושבו בצפיפות מים קרים, והפער מגיע לכ-4% ב-100°C. הצמיגות הקינמטית מחושבת $\rho / \mu = \nu$, ולכן cSt ו-cP כמעט זהים במים סביב טמפרטורת החדר. שורות מודגשות: 4°C צפיפות מרבית · 20°C טמפרטורת ייחוס · 100°C נקודת רתיחה בלחץ אטמוספרי. מקור הנתונים: IAPWS-IF97 (ניסוח תעשייתי לתכונות מים), בלחץ אטמוספרי בגובה פני הים.

איך לקרוא את הטבלה

ρ	צפיפות (density). יורדת עם החימום. מ-1000 ב-4°C עד 958 ב-100°C.	kg/m^3	p_v	לחץ אדים (vapor pressure). הלחץ שבו המים רותחים בטמפרטורה הנתונה. הגיבור של חישוב NPSH.	kPa
μ	צמיגות דינמית (dynamic viscosity). ההתנגדות הפנימית לזרימה. צונחת מהר עם החימום.	$\text{mPa} \cdot \text{s}$	ν	צמיגות קינמטית (kinematic viscosity). $\nu = \mu / \rho$. נכנסת ישירות למספר ריינולדס.	$10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$
c_p	חום סגולי (specific heat). אנרגיה לחימום ק"ג מים במעלה אחת. כמעט קבוע 4.18.	$\text{kJ}/\text{kg} \cdot \text{K}$	cP / cSt	יחידות שדה נפוצות: centipoise ו-centistokes. $1 \text{ cP} = 1 \text{ mPa} \cdot \text{s}$, $1 \text{ cSt} = 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$.	-

למה 4°C מודגש

למים יש **אנומליה** ייחודית: הצפיפות המרבית אינה בנקודת הקיפאון אלא סביב 4°C, שם $\rho \approx 1000 \text{ kg/m}^3$ (999.97 ליתר דיוק). מתחת ל-4°C המים מתחילים להתרחב שוב לקראת הקיפאון. בגלל זה הקרח צף ואגמים קופאים מלמעלה. בחישובי משאבה זו הסיבה שמקובל לקחת $\rho = 1000$ כערך ייחוס למים קרים.

שלוש המסקנות התפעוליות

א. לחץ אדים מזין את חישוב NPSH

עמודת p_v (במטרים) נכנסת ישירות לנוסחת ה-NPSH הזמין מפרק 14: $NPSH_a = (p_{atm} - p_v) / \rho g \pm H_s - h_f$. שימו לב לקצב העלייה: ב-25°C לחץ האדים הוא 0.32 m בלבד וזניח, אך ב-60°C הוא כבר 2.03 m **ובולע שני מטרים שלמים** מ-NPSH הזמין. אותו מתקן בדיוק יכול לעבוד בחורף ולקוות בקיץ. תכננו תמיד לפי הטמפרטורה הגבוהה ביותר הצפויה.

ב. צמיגות יורדת, אך נשאר קריטית לנוזלים אחרים

במים, הצמיגות יורדת לחצי בערך בין 20°C ל-70°C, אך נשאר קרובה ל-1 cSt ולכן מתעלמים ממנה בחישובי מים שגרתיים. **אזהרה:** לנוזלים צמיגים (שמן, בוצה, סירופ) הצמיגות גבוהה פי עשרות ויש לתקן את עקום היצרן לפי תקני Hydraulic Institute (ראו פרק 2). הערכים כאן תקפים למים נקיים בלבד.

ג. צפיפות וחום סגולי כמעט קבועים

בין 0°C ל-100°C הצפיפות יורדת רק כ-4% והחום הסגולי משתנה פחות מ-1%. לכן בחישובי שדה מקובל $\rho \approx 1000 \text{ kg/m}^3$ ו- $c_p \approx 4.18 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$ בלי תיקון. זכרו: העומד (במטרים) שמשאבה מייצרת אינו תלוי כמעט בצפיפות, אך **הלחץ** (בבר) ו**ההספק** הנדרש כן.

לחץ אטמוספרי מול גובה

הגודל השני בנוסחת ה-NPSH הוא הלחץ האטמוספרי, והוא **יורד עם הגובה**. תחנה ברמות הגולן או בהרי ירושלים מתחילה בעודף עומד נמוך יותר עוד לפני כל חישוב אחר. הטבלה הקצרה הזו נותנת את הערך לגבהים נפוצים בישראל. כלל אצבע: הלחץ יורד בערך 1.2 kPa לכל 100 m, שהם כ-0.12 m עמוד מים.

טבלה B.2 • לחץ אטמוספרי מול גובה מעל פני הים

גובה (M)	P_{ATM} (KPA)	P_{ATM} (MH ₂ O)	הערה
0	101.3	10.33	פני הים • ערך הייחוס
300	97.7	9.96	גבעות שפלה
500	95.5	9.73	–
700	93.2	9.50	הרי ירושלים / גליל עליון
1000	89.9	9.17	רמות הגולן הגבוהות

חושב לפי הנוסחה הברומטרית $p = 101.325 \cdot (1 - 2.2557 \times 10^{-5} \cdot h)^{5.2559}$ באטמוספירה תקינה. בתכנון בגובה אל תשתמשו ב-10.33, אלא בערך מהטבלה. ההפרש בין פני הים ל-700 m הוא כ-0.83 שנגרעים ישירות מ-NPSH הזמין.

שלוש הערות חשובות לפני שמחשבים

- **תיקון לגובה (a):** הלחץ האטמוספרי יורד כ-0.12 m עמוד מים לכל 100 m גובה, כלומר כ-1.2 kPa לכל 100 m. תמיד גורעים את ההפרש מ-NPSH הזמין בתחנות הרריות.
- **מים מליחים (b):** למי ים ולמים מליחים (brackish) הצפיפות גבוהה יותר, $\rho \approx 1025 \text{ kg/m}^3$ בערך. אותו עומד (במטרים) דורש לחץ גבוה יותר ולכן הספק גדול יותר: $\rho \cdot g \cdot H + 2.5\%$ הספק לאותה נקודת עבודה.
- **קישור ל-NPSH (c):** ערכי לחץ האדים בטבלה B.1 הם בדיוק הקלט לחישוב ה-NPSH הזמין בפרק 14. גזרו את p_v בטמפרטורת העבודה ואת p_{atm} מהטבלה B.2, והציבו בנוסחה 14.1.

דוגמה מהירה לשילוב שתי הטבלאות

תחנה בגובה 700 m שואבת מים ב-25°C. מטבלה B.2: $p_{atm} = 9.50$ m. מטבלה B.1: $p_v(25^\circ\text{C}) = 0.32$ m. עוד לפני שהוספנו גובה יניקה וחיתוך, הבסיס ל-NPSH הזמין הוא 9.50 m, $9.50 - 0.32 = 9.18$ m, לעומת 10.01 m בגובה פני הים. הגובה לבדו גנב 0.83 m מהמרווח.

אז מה? טמפרטורה וגובה הם שני המתגים שמזיזים את כל חישוב היניקה. שתי הטבלאות בנספח הזה, B.1 ו-B.2, הן הקלט הקבוע של פרק 14. כשמתכננים תחנה או מאבחים קוויטציה, פותחים אותן ראשונות: קוראים את p_v לפי טמפרטורת הקיץ ואת p_{atm} לפי הגובה, ורק אז מחשבים. שתי שורות בטבלה חוסכות מאיץ שרוף.

C מקדמי חיכוך ואיבודי אביזרים

Friction Factors & Fitting Losses

זה נספח העבודה של כל חישוב עומד חיכוך. ארבע טבלאות עזר שתחזור אליהן בכל בניית עקום מערכת, בכל בדיקת NPSH ובכל אבחון ירידת ספיקה: מקדם Hazen-Williams C לפי חומר הצינור, מקדמי איבוד אביזרים K, חספוס מוחלט ϵ ל-Darcy-Weisbach, ומהירויות זרימה מומלצות. כל הערכים הם ערכי ייחוס סטנדרטיים מתוך Crane TP-410, Hydraulic Institute ו-Engineering Toolbox, ומשתנים מעט בין יצרנים וקטרים.

איך להשתמש בנספח הזה

שתי הנוסחאות שמאחורי כל הטבלאות נדונו במלואן בפרק 16 (עקום המערכת). איבוד לאורך צינור ישר: Hazen-Williams (טבלה C.1) למים בטמפרטורת חדר, או Darcy-Weisbach עם חספוס ϵ (טבלה C.3) לכל נוזל ולכל משטר. איבודי אביזרים מקומיים: שיטת מקדם K (טבלה C.2). מהירות הזרימה שמזינה את כל אלה נבדקת מול טבלה C.4. עקרון העל של איבודי אביזרים הוא תזכורת אחת קצרה למטה.

תזכורת • ראש המהירות

$$h_{\text{minor}} = K \cdot v^2 / (2g) \quad \cdot \quad h_{\text{fittings}} = (\sum K) \cdot v^2 / (2g)$$

K	מקדם האיבוד של האביזר, חסר-יחידות (טבלה C.2). כל אביזר גובה כפולה של ראש המהירות.
v	מהירות הזרימה הממוצעת [m/s]. $v = Q / A = 4Q / (\pi D^2)$.
2g	ממיר אנרגיה קינטית לעומד מטרים. $2 \times 9.81 = 19.62 \text{ m/s}^2$.
$\sum K$	מחברים את K של כל האביזרים בקו, ומכפילים בראש מהירות אחד. ראה דוגמה 16.1.

מקדם Hazen-Williams C

המקדם C מאגד את חומר הצינור ואת מצבו למספר אחד. גבוה = פנים חלקות = איבוד נמוך. הוא יורד עם השנים בגלל חלודה, שקיעת מינרלים וביופילם, ולכן ניתנת עמודת "חדש" ועמודת "ישן/בלאי". בתכן חדש מומלץ לחשב לפי C עתידי (ישן), לא לפי C של היום, אחרת המתקן "ייחלש" עם השנים.

טבלה C.1 • מקדם Hazen-Williams C לחומרי צינור נפוצים

חומר הצינור	C (חדש)	C (ישן/בלאי)	הערה הנדסית
PVC / פוליאיתילן (PE)	150	140	חלק מאוד, איבוד נמוך, נפוץ בקווי מים
פלדה מצופה מלט (cement-lined ductile)	140	120	נפוץ בקווי הולכה ראשיים
אסבסט-צמנט (AC)	140	120	קווים ותיקים, פנים חלקות יחסית
יצקת ברזל חדשה (cast iron)	130	100	יורד עם השנים בגלל שקיעות פנימיות
בטון (concrete)	130	120	תלוי בגימור הפנים והיציקה
פלדה לא מצופה (new steel)	130-140	90-100	חלודה מורידה את C משמעותית
פלדה ישנה / מחלידה כבדה	100	65-90	איבוד גבוה, חשוד מרכזי לירידת ספיקה
פלדה מגולוונת (galvanized)	120	100	טוב בהתחלה, מתכרסם עם הזמן

חזקת הספיקה ב-Hazen-Williams היא 1.852 (ולא 2.0 מדויק כמו ב-Darcy). תקף למים בטמפרטורת חדר ולמספרי Reynolds בטווח קווי מים. לנוזלים צמיגים או חמים, עדיף Darcy-Weisbach. לפלדה חדשה מקובלים גם ערכי תכן שמרניים של 120.

מקדמי איבוד אביזרים K

כל מרפק, הסתעפות, שסתום, מגוף, מסנן וכניסה גוברים "מס" אנרגיה מקומי, פרופורציוני לראש המהירות. הטבלה מסכמת ערכי K טיפוסיים לאביזר פתוח לחלוטין. שים לב: למגוף ויסות שנוק, K אינו קבוע אלא מטפס בחדות ככל שסוגרים אותו, וזה בדיוק מה שמתליל את עקום המערכת בשניקה ומבזבז אנרגיה.

טבלה C.2 • מקדמי איבוד K לאביזרים נפוצים (פתוח לחלוטין)

אביזר	טיפוסי K	קבוצה / הערה
מרפק 90° רגיל (standard elbow)	0.75	מרפקים
מרפק 90° רחב-רדיוס (long-radius)	0.45	מרפקים · עדיף, פחות איבוד
מרפק 45° (elbow 45°)	0.40	מרפקים
הסתעפות T זרימה ישרה (tee, run)	0.4	הסתעפויות
הסתעפות T זרימה צידית (tee, branch)	1.0-1.8	הסתעפויות · המעבר לענף יקר
מגוף טריז פתוח (gate valve, open)	0.15	שסתומים · האיבוד הנמוך ביותר
שסתום גלוב פתוח (globe valve, open)	6.0-10	שסתומים · יקר, נמנע בקווי הולכה · לא לבלבל עם ברז כדורי (שורה נפרדת)
ברז כדורי פתוח (ball valve, open)	0.05-0.1	שסתומים · מעבר מלא, כמעט אפס

אביזר	טיפוסי K	קבוצה / הערה
שסתום פרפר פתוח (butterfly valve)	0.6–1.2	שסתומים · הדף תמיד נשאר בזרם
שסתום אל-חוזר נדנדה (swing check valve)	2.0–2.5	שסתומים · תלוי בספיקה ובמשקל הדף
רגלית יניקה + מסננת (+ foot valve strainer)	2.5–15	יניקה · מוריד NPSHa, ראה פרק 15
מסנן / מסננת (strainer)	2.0–3.0	אביזרים · גדל מאוד כשהוא מתלכלך
מד מים / מד ספיקה (water meter)	3.0–7.0	אביזרים
כניסה חדה מהמאגר (sharp entrance)	0.5	כניסה / יציאה
כניסה מעוגלת (rounded entrance)	0.05	כניסה / יציאה · עדיף ביניקה
יציאה למאגר (exit, free discharge)	1.0	כניסה / יציאה · כל ראש המהירות אובד
מעבר מצמצם הדרגתי (reducer)	0.1–0.3	מעברי קוטר · על המהירות הגבוהה
מעבר מרחיב הדרגתי (expander / diffuser)	0.2–0.8	מעברי קוטר · על המהירות הגבוהה
הצרה פתאומית (sudden contraction)	0.3–0.5	מעברי קוטר · תלוי ביחס הקטרים
הרחבה פתאומית (sudden expansion)	0.5–1.0	מעברי קוטר · עד 1.0 ביחס קיצוני

ערכי K יורדים מעט עם הגדלת הקוטר, ואביזרים מאוגנים (flanged) נמוכים מתברגים (screwed). למעברי קוטר, ראש המהירות מחושב על הקוטר הקטן (המהירות הגבוהה). למגוף ויסות, K מטפס מ-0.15 ~ פתוח עד >100 כמעט סגור.

חשפוס מוחלט ε ל-Darcy-Weisbach

בנוסחת Darcy-Weisbach מקדם החיכוך f נקרא מדיאגרמת Moody לפי מספר Reynolds ולפי החשפוס היחסי ε/D . החשפוס המוחלט ε הוא גובה אי-הסדירות של פני הצינור, ביחידות מילימטר. ככל שהצינור חלק יותר, ε קטן יותר ו-f נמוך יותר. שים לב: מה שקובע בפועל את החיכוך הוא היחס ε/D , לא ε לבדו.

טבלה C.3 • חספוס מוחלט ϵ לחומרי צינור (זרימה סוערת)

חומר הצינור	חספוס (mm)	חספוס (FT $\times 10^{-3}$)	הערה
PVC / פלסטיק חלק (smooth plastic)	0.0015	0.005	החלק ביותר, "צינור חלק הידראולית"
צינור מתוח (drawn tubing: נחושת, פליז)	0.0015	0.005	נחושת, פליז, זכוכית
פלדה מסחרית (commercial steel)	0.045	0.15	ערך הייחוס הנפוץ לפלדה חדשה
יצקת ברזל מצופה ביטומן (asphalt-coated cast iron)	0.12	0.40	ציפוי ביטומן מחליק את הפנים
פלדה מגולוונת (galvanized steel)	0.15	0.50	גס יותר מפלדה חלקה
יצקת ברזל (cast iron)	0.26	0.85	גס, ועולה עם חלודה ושקיעות
בטון (concrete)	0.3–3.0	1.0–10	טווח רחב לפי גימור היציקה
פלדה מחלידה / צינור ישן	1.0–3.0	3.0–10	חלודה מעבה מכפילה את ϵ פי עשרות

תזכורת לחישוב: $Re = v \cdot D / \nu$, עם $\nu \approx 1.0 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ למים ב- 20°C . בזרימה סוערת טיפוסית (קווי מים), f נופל בטווח 0.015–0.04. לצינור חלק, ערך התחלתי סביר הוא $f \approx 0.02$.

מהירויות זרימה מומלצות

בחירת קוטר הצינור היא איזון בין שני סיכונים. מהירות נמוכה מדי מאפשרת שקיעת מוצקים ובוצה; מהירות גבוהה מדי מקפיצה את החיכוך (פרופורציוני ל- v^2), גורמת לשחיקה ולסכנת פטיש מים, ובצד היניקה מורידה את NPSHa וקרובה לקוויטציה. לכן צד היניקה תמיד שמרני יותר מצד הסניקה.

טבלה C.4 • מהירויות זרימה מומלצות בקווי מים

קטע	טווח מומלץ (M/S)	מקסימום (M/S)	נימוק הנדסי
צד יניקה (suction)	0.6–1.5	1.8	שמרני: שומר על NPSHa מונע קוויטציה
צד סניקה (discharge)	1.0–3.0	3.5	איזון חיכוך מול עלות הצינור
קווי הולכה ארוכים (transmission)	1.0–2.0	2.5	חיכוך מצטבר לאורך, עדיף נמוך
קווי חלוקה (distribution)	0.9–2.0	2.5	מאזן בין שקיעה לחיכוך
קו מינימום (למניעת שקיעה)	≥ 0.6	–	מתחת לכך: שקיעת מוצקים ובוצה

תזכורת מהירות: $v = 4Q / (\pi D^2)$. לבדיקה מהירה, Q חלקי $2,830 \cdot D^2$ (עם D במטרים) נותן v בקירוב; בצורת שדה נוחה: $v \approx 354 \cdot Q / D^2$, עם D במילימטרים. חרוג מהמקסימום רק בקטעים קצרים ולזמן קצר.

הקוטר הוא המלך

בנוסחת Hazen-Williams, החיכוך תלוי בקוטר בחזקה $D^{4.87}$. הכפלת הקוטר מקטינה את החיכוך פי כ-29, ומורידה את המהירות פי ארבעה. הגדלת קוטר היניקה או הסניקה היא הדרך הזולה והיעילה ביותר להוריד עומד חיכוך, להחליק את עקום המערכת ולחסוך אנרגיה לאורך כל חיי המתקן. בתכן חדש, אל תחסוך באינטש הזה.

קישורים בספר

שתי הנוסחאות שמאחורי הטבלאות, Hazen-Williams ו-Darcy-Weisbach, ושיטת מקדם K , נדונות במלואן בפרק 16 (עקום המערכת ונקודת העבודה), כולל דוגמה מספרית מלאה. השפעת איבודי היניקה על NPSHa והקשר לקוויטציה בפרק 15. תכונות המים (צפיפות, צמיגות ν , לחץ אדים) מול טמפרטורה בנספח B. טבלאות המרת יחידות בנספח A.

D דף נוסחאות מרוכז

Formula Sheet

כל הנוסחאות המרכזיות של הספר במקום אחד, מקובצות לפי נושא. זה הדף שתלוש אותו ותחזיק לידך בשטח. כל נוסחה מלווה בשורת "איפה" קצרה שמסבירה את הגדלים ואת היחידות, ובהפניה לפרק שבו היא מפותחת במלואה.

מוסכמות יחידות בדף הזה (אלא אם צוין אחרת): ספיקה Q ב- m^3/h , עומד ו-NPSH ב- m , הספק P ב- kW , מהירות סיבוב n ב- rpm , מתח U ב- V , זרם I ב- A . למים קרים: $\rho \approx 1000 \text{ kg/m}^3$, $g = 9.81 \text{ m/s}^2$.

הידראוליקה Hydraulics

בסיס הזרימה: לחץ מול עומד, שימור אנרגיה, ומשטר הזרימה. מפותח בפרק 2.

רציפות Continuity

$$Q = A \cdot v$$

A שטח חתך $[m^2]$, v מהירות $[m/s]$, Q ב- $[m^3/s]$ בנוסחה זו.
פרק 2

לחץ ועומד Pressure-head

$$p = \rho \cdot g \cdot H$$

p לחץ $[Pa]$, H עומד $[m]$, מים: $1 \text{ bar} \approx 10 \text{ m}$. פרק 2

מספר ריינולדס Reynolds

$$Re = v \cdot D / \nu$$

D קוטר $[m]$, ν צמיגות קינמטית $[m^2/s]$, מים $\approx 1 \times 10^{-6}$. $Re < 2300$ למיני, $Re > 4000$ טורבולנטי. פרק 2

ברנוולי Bernoulli (total head)

$$H_t = p/(\rho g) + v^2/(2g) + z$$

עומד כולל = לחץ + מהירות + גובה $[m]$. נשמר בזרימה אידאלית.
פרק 2

הספק ונצילות Power & Efficiency

לב בדיקת הנצילות לפי ISO 9906. הקבוע 367 מאחד את היחידות הנוחות לשטח. מפותח בפרקים 4 ו-24.

הספק חשמלי תלת-פאזי Input power

$$P_1 = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \cos\phi / 1000$$

U מתח קווי $[V]$, I זרם $[A]$, $\cos\phi$ מקדם הספק כעשרוני (0.85 לא (85). פרק 4

הספק הידראולי Hydraulic power

$$P_h = Q \cdot H / 367$$

Q $[m^3/h]$, H $[m]$, P_h $[kW]$. $367 \approx (1000 \cdot 3600) / (1000 \cdot 9.81)$.
פרק 4. = 366.97

· Specific energy **צריכה סגולית**

$$SEC = P_1 / Q \text{ [kWh/m}^3\text{]}$$

צורה נגזרת: $SEC \approx H / (367 \cdot \eta / 100)$. הגדרה אחידה בכל הספר. **פרק 24**

· Total efficiency **נצילות כוללת**

$$\eta = (P_h / P_1) \cdot 100 \text{ [%]}$$

חוט-למים. כולל מנוע, ממיר ומשאבה יחד. המספר שמשדר האנרגיה דורש. **פרק 24**

· Ministry threshold **סף משרד האנרגיה**

$$\eta \geq 55\% \text{ ; שאיבה } \eta \geq 65\%$$

נצילות כוללת בנקודת העבודה. רטסט כל 30 חודש או 7,500 ש"ע. **פרק 24**

· Efficiency chain **שרשרת נצילות**

$$\eta_{\text{total}} = \eta_{\text{pump}} \cdot \eta_{\text{motor}} \cdot \eta_{\text{VFD}}$$

$$\eta_{\text{pump}} = \eta_{\text{h}} \cdot \eta_{\text{v}} \cdot \eta_{\text{m}} \text{ (הידראולי · נפחי · מכני). פרק 4}$$

אווילר וחוקי הדמיות Euler & Affinity Laws

משוואת אווילר נותנת את העומד התאורטי מתלת-המהירויות. חוקי הדמיות מתרגמים כל שינוי במהירות או בקוטר המאיץ לעקום חדש. מפותח בפרקים 3 ו-14.

· Speed scaling **דמיות לפי מהירות**

$$Q \propto n \text{ ; } H \propto n^2 \text{ ; } P \propto n^3 \text{ ; } NPSHr \propto n^2$$

יחס מהירויות $r = n_2/n_1$. הורדת 20% מהירות $\rightarrow 0.8^3 = 51\%$. הספק. **פרק 14**

· Euler head **משוואת אווילר**

$$H_{\text{th}} = (u_2 \cdot c_{u2} - u_1 \cdot c_{u1}) / g$$

c_u רכיב היקפי של מהירות מוחלטת בכניסה (1) וביציאה (2) מהמאיץ. **פרק 3**

· Diameter trim **דמיות לפי קוטר**

$$Q \propto D \text{ ; } H \propto D^2 \text{ ; } P \propto D^3$$

אותם מערכים עם $r = D_2/D_1$. תקף עד חיתוך של כ-15-20% בלבד. **פרק 14**

· Blade tip speed **מהירות היקפית**

$$u = \pi \cdot D \cdot n / 60$$

D קוטר המאיץ [m] · n מהירות סיבוב [rpm] $\rightarrow u$ [m/s]. **פרק 3**

מהירות סגולית Specific Speed

מספר חסר-ממד שמסווג את גיאומטריית המאיץ ומנבא רגישות לקוויטציה. מפותח בפרקים 11 ו-15.

· Suction speed **מהירות סגולית ניקה**

$$N_{\text{ss}} = n \cdot \sqrt{Q} / NPSHr^{0.75}$$

מעל 11,000 (יחידות US) רגישות לרה-סירקולציה ולקוויטציה. **פרק 15**

· Specific speed **מהירות סגולית**

$$n_q = n \cdot \sqrt{Q} / H^{0.75}$$

בנקודת ה-BEP, Q ב- m^3/s בלבד (המוסכמה האירופית; שימוש ב- m^3/h מנפח את התוצאה פי 60~ ושובר את טווחי הסיווג של פרק 11). נמוך = רדיאלי, גבוה = צירי. **פרק 11**

מאזן האנרגיה בצד היניקה. משווים זמין מול נדרש, תמיד עם שולי ביטחון. מפותח בפרק 15.

מספר תומא σ Thoma

$$\sigma = \text{NPSH}_r / H$$

מנרמל את דרישת היניקה מול עומד המשאבה. חסר-ממד. פרק 15

NPSH זמין NPSH available

$$\text{NPSH}_a = (p_{\text{atm}} - p_v) / (\rho g) \pm H_s - h_f$$

H_s חיובי בהצפה, שלילי ביניקה. h_f חיכוך יניקה תמיד מוחסר. פרק 15

תיקון לחץ אטמוספרי לגובה Altitude

$$p_{\text{atm}} \approx 10.33 - 0.0012 \cdot h$$

h גובה מעל פני הים [m]; ירידה של כ-0.12 m לכל 100 m. פרק 15

שולי ביטחון Safety margin

$$\text{NPSH}_a \geq 1.3 \cdot \text{NPSH}_r$$

או לפחות $\text{NPSH}_a - \text{NPSH}_r \geq 0.6 \text{ m}$. נוזל חם/משאבה גדולה → פרק 15

עקום מערכת ואיבודים System Curve & Losses

העקום של הצנרת, שחיתוכו עם עקום המשאבה קובע את נקודת העבודה. שתי שיטות לחיכוך ואיבוד אביזרים. מפותח בפרק 16.

איבוד חיכוך H-W (Hazen-Williams)

$$h_f = 10.67 \cdot L \cdot Q^{1.852} / (C^{1.852} \cdot D^{4.87})$$

C מקדם חספוס (פלדה ~120, PVC ~150) [m]D, [m³/s]Q מים בלבד. פרק 16

עקום מערכת System head

$$H_{\text{sys}} = H_{\text{stat}} + k \cdot Q^2$$

H_{stat} עומד סטטי (הפרש גובה + לחץ קבוע) k מקדם החיכוך הכולל. פרק 16

איבוד חיכוך Darcy-Weisbach (Darcy)

$$h_f = f \cdot (L/D) \cdot v^2 / (2g)$$

f מקדם חיכוך (Moody) L אורך D קוטר [m]. כללי, כל נוזל. פרק 16

איבוד אביזר מקומי Minor loss

$$h = K \cdot v^2 / (2g)$$

K מקדם האביזר (מרפק 90° ~0.75, מגוף פתוח ~0.15). מסכמים על כל האביזרים. פרק 16

מנועים Motors

המהירות הסינכרונית נקבעת מהתדר ומספר הקטבים; ההחלקה היא ההפרש בפועל. מפותח בפרק 19.

· Slip החלקה

$$s = (n_s - n) / n_s$$

n מהירות בפועל תחת עומס. מנוע השראה טיפוסי: $s \approx 1-5\%$.
פרק 19

· Synchronous speed מהירות סינכרונית

$$n_s = 120 \cdot f / p$$

f תדר [Hz], p מספר קטבים $n_s \rightarrow [rpm]$. ב-2: 50Hz
קטבים=4, 3000=1500. פרק 19

כלכלה Economics

המספרים שמצדיקים שדרוג. עלות מחזור חיים שמה את החשמל במרכז ההחלטה, לא את מחיר הרכישה. מפותח בפרק 26.

· Simple payback פשוט החזר השקעה

$$\text{Payback} = \text{השקעה} / \text{חיסכון שנתי}$$

בשנים. כלל אצבע: שדרוג עם החזר ≤ 3 שנים מומלץ בחום. פרק 26

· Life Cycle Cost עלות מחזור חיים

$$LCC = C_{ic} + C_e + C_o + C_m + C_d$$

רכישה + אנרגיה + תפעול + תחזוקה + פירוק, כולם ב-NPV.
אנרגיה ~85%. פרק 26

· Net Present Value ערך נוכחי נקי

$$NPV = -C_0 + \sum CF_t / (1+r)^t$$

C_0 השקעה ראשונית r שער היוון (~6%) t שנה. $NPV > 0$
כדאי. פרק 26

· Annual energy cost עלות אנרגיה שנתית

$$C_{\text{year}} = P_1 \cdot t \cdot \text{tariff}$$

t שעות עבודה בשנה · tariff kWh/ש (מ"ג 0.40, מ"נ 0.50, ללא מע"מ). פרק 26

מצבים חולפים Transients (Water Hammer)

עליית הלחץ הפתאומית כשהזרימה נעצרת. עלולה לקרוע צנרת. מפותח בפרק 21.

· Surge head עליית עומד שקולה

$$\Delta H = a \cdot \Delta v / g$$

סגירה מהירה של $\Delta v = 2 \text{ m/s}$ מוסיפה מאות מטרי עומד רגועים (כ-200–265 עבור $a = 1000-1300 \text{ m/s}$). פרק 21

· Joukowsky surge עליית לחץ Joukowsky

$$\Delta p = \rho \cdot a \cdot \Delta v$$

a מהירות גל הלחץ במים (~1000–1400 m/s) Δv שינוי מהירות הזרימה. פרק 21

קבועים והמרות מהירות Constants & Conversions

הערכים שתחזור אליהם בכל חישוב. שתי הטבלאות הבאות הן ליבת הדף התלוש.

טבלה D.1 • קבועים פיזיקליים ומקדמים

גודל	סמל	ערך	הערה
תאוצת הכובד	g	9.81 m/s ²	קבוע
צפיפות מים (20°C)	ρ	998 kg/m ³	קר ~1000
קבוע הספק הידראולי	-	367	$P_h = Q \cdot H / 367$
צמיגות קינמטית מים	ν	1.0×10 ⁻⁶ m ² /s	20°C
לחץ אטמוספרי (גובה ים)	p_atm	10.33 m	kPa 101.3
מהירות גל לחץ במים	a	~1000–1400 m/s	תלוי בצנרת
מהירות סינכרונית 50Hz	n_s	3000 / 1500 rpm	4 / 2 קטבים
מקדם TOE לסקר	-	0.00021	ממונה: 0.00026

טבלה D.2 • המרות יחידות שכדאי לזכור בעל פה

המרה	יחס	המרה	יחס
ספיקה	1 L/s = 3.6 m ³ /h	לחץ	10 m ≈ 1 bar
לחץ	1 bar = 10.20 m	לחץ	1 atm = 10.33 m
הספק	1 HP = 0.746 kW	לחץ	1 kPa = 0.102 m
ספיקה	1 m ³ /h = 4.40 gpm	לחץ	1 psi = 0.703 m

איך לקרוא את הדף הזה

כל קבוצת נוסחאות מפותחת במלואה בפרק שצוין בקצה כל כרטיס (פרק N). אם נוסחה לא מסתדרת בשטח, חזור לפרק לראות את ההנחות, גבולות התוקף והדוגמה הפתורה. טבלאות החיכוך ומקדמי האביזרים בנספח C, ומילון המונחים בנספח E.

E מילון מונחים עברי-אנגלי

Hebrew-English Glossary

זהו הלקסיקון של עולם המשאבות, עברית לצד אנגלית ועם הגדרה קצרה לכל מונח. בשטח ומול ספקים, יצרנים וקטלוגים נדרשים שני השמות. כל מונח כאן מופיע במקום כלשהו בספר, ושמרנו על אותו תרגום עקבי לאורך כל הפרקים: מאיץ (גם "אימפלר"), גוף המשאבה ולא "מארז", אטם חבל ולא "פאקינג".

המונחים מסודרים לפי נושא בשבע קבוצות: רכיבי המשאבה, גדלים הידראוליים, מכניקת זורמים, ביצועים ועקומות, קוויטציה ויניקה, הנעה ובקרה, ואחזקה, רגולציה וכלכלה. בתוך כל טבלה הסדר הוא לפי זרימת הלמידה בספר.

טבלה E.1 • רכיבי המשאבה (Pump Components)

עברית	ENGLISH	הגדרה
משאבה צנטריפוגלית	centrifugal pump	מכונה שמוסיפה אנרגיה לנוזל בעזרת מאיץ מסתובב, ומסלקת אותו בכוח צנטריפוגלי.
מאיץ	impeller	הרכיב המסתובב עם הלהבים שמאיץ את הנוזל ומעניק לו את האנרגיה. לא "אימפלר".
גוף המשאבה	casing	המעטפת שאוספת את הנוזל מהמאיץ וממירה מהירות ללחץ. לא "מארז".
גוף לשון (ספירלה)	volute casing	התעלה הספירלית ההיקפית של גוף המשאבה, שאוספת את הנוזל מהמאיץ וממירה מהירות ללחץ.
לשון	cutwater / tongue	הנקודה שבה גוף הלשון נסגר ומפריד בין נוזל שמסיים סיבוב לנוזל שמתחיל; מקור עיקרי לעומס רדיאלי ולרעש תדר-להבים.
מפזר	diffuser	טבעת להבים נייחת סביב המאיץ שממירה מהירות ללחץ. חלופה לגוף הלשון, נפוצה במשאבות רב-דרגתיות.
להבי המאיץ	vanes / blades	הכנפיים המעוקלות של המאיץ שמכוונות את הנוזל ומעבירות אליו את עבודת הסיבוב.
דופן המאיץ	shroud	הדיסקה הסוגרת על להבי המאיץ. מאיץ סגור עם שתי דפנות, חצי-פתוח עם אחת.
עין היניקה	impeller eye	הפתח המרכזי שבו הנוזל נכנס למאיץ. קוטר גדול יותר מוריד את $NPSH_r$.
טבעת שחיקה	wear ring	טבעת מתחלפת בין מאיץ לגוף שמצמצמת דליפה פנימית. בלאי שלה מוריד נצילות.
ציר	shaft	המוט שמעביר את המומנט מהמנוע למאיץ.

עברית	ENGLISH	הגדרה
שרוול ציר	shaft sleeve	שרוול מתכלה שמגן על הציר באיזור האטם.
מסב	bearing	הרכיב שתומך בציר ומאפשר סיבוב חופשי. נושא עומסים רדיאליים וציריים.
מצמד	coupling	החיבור שמעביר מומנט בין ציר המנוע לציר המשאבה ומפצה על אי-יישור קל.
תושבת	baseplate	הבסיס הקשיח שעליו מורכבים המשאבה והמנוע, שומר על יישור ביניהם.
אטם מכני	mechanical seal	זוג פני אטימה מלוטשים, נייח ומסתובב, שמונע דליפה לאורך הציר. תקן אטימה מודרני.
אטם חבל	gland packing	חבל אטימה דחוס בתיבת האטם. זול, מותר לו לטפטף מעט לקירור.
תיבת אטם	stuffing box	התא בגוף המשאבה שבו יושבות טבעות האטימה (החבל) סביב הציר.
תא איזון	balance drum / disc	רכיב שמקזז את הדחף הצירי במשאבות רב-דרגתיות.
משאבת טורבינה אנכית	vertical turbine pump	משאבה רב-דרגתית אנכית בתוך קידוח, מאיצים על ציר ארוך ומנוע מעל פני הקרקע.
משאבה טבולה	submersible pump	יחידת משאבה ומנוע אטומים יחד הטבולים בנוזל. נפוצה בקידוחי מים.
משאבה בגוף מפוצל אופקית	split-case pump	גוף משאבה שנפתח לאורך מישור הציר לתחזוקה בלי לפרק את הצנרת.
משאבה רב-דרגתית	multistage pump	כמה מאיצים בטור על ציר אחד. כל דרגה מוסיפה עומד, לעומדים גבוהים.

טבלה E.2 • גדלים הידראוליים (Hydraulic Quantities)

עברית	ENGLISH	הגדרה
ספיקה	flow rate • Q	נפח הנוזל שעובר ליחידת זמן. נמדד ב- m^3/h או L/s .
עומד	head • H	אנרגיה לכל יחידת משקל של נוזל, מבוטאת בגובה עמוד מים [m]. השפה הבסיסית של משאבות.
לחץ	pressure • p	כוח ליחידת שטח [Pa, bar]. במים $10\text{ m} \approx 1\text{ bar}$.
עומד לחץ	pressure head	רכיב העומד שמקורו בלחץ הסטטי: $p / (\rho \cdot g)$.
עומד מהירות	velocity head	רכיב העומד שמקורו בתנועת הנוזל: $v^2 / (2g)$.
עומד גובה	elevation head	רכיב העומד שמקורו בגובה מעל מפלס ייחוס: z.
עומד כולל	total head	סכום עומד הלחץ, המהירות והגובה. נשמר בזרימה אידאלית (ברנולי).

עברית	ENGLISH	הגדרה
הספק הידראולי	hydraulic power · P_h	ההספק שנמסר לנוזל בפועל: $P_h = Q \cdot H / 367$ ב-kW.
הספק על הציר	shaft power · P_2	ההספק המכני שהמנוע מעביר לציר המשאבה.
הספק חשמלי	electrical power · P_1	ההספק הנשאב מהרשת: $P_1 = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \cos \varphi / 1000$ [kW].
נצילות	efficiency · η	היחס בין הספק מוצא להספק מבוא, באחוזים. $\eta = P_h / P_1$ לנצילות כוללת.
נצילות משאבה	pump efficiency	נצילות חלק המשאבה בלבד, ללא מנוע וממיר. רכיב בשרשרת הנצילות.
צריכה סגולית	specific energy · SEC	אנרגיה לכל מ"ק שנשאב: $SEC = P_1 / Q$ ב- kWh/m^3 . מדד ההשוואה המרכזי.
צפיפות	density · ρ	מסה ליחידת נפח. מים קרים $\approx 1000 \text{ kg/m}^3$.
מהירות סיבוב	rotational speed · n	קצב סיבוב הציר [rpm]. קובע עומד, ספיקה והספק דרך חוקי הדמיות.
מהירות היקפית	peripheral speed · u	המהירות הקווית בקצה המאיץ: $u = \pi \cdot D \cdot n / 60$. קובעת את העומד שניתן לפתח.

טבלה E.3 • מכניקת זורמים וזרימה בצנרת (Fluid Mechanics & Piping)

עברית	ENGLISH	הגדרה
משוואת ברנולי	Bernoulli equation	שימור העומד הכולל בזרימה אידאלית, חיבור עומדי לחץ, מהירות וגובה.
רציפות	continuity	שימור המסה: $Q = A \cdot v$. בצינור צר המהירות עולה.
מספר ריינולדס	Reynolds number · Re	יחס בין כוחות אינרציה לצמיגות. קובע אם הזרימה למינרית או טורבולנטית.
זרימה למינרית	laminar flow	זרימה חלקה בשכבות, $Re < 2300$. נדירה בצנרת מים.
זרימה טורבולנטית	turbulent flow	זרימה מערבולתית, $Re > 4000$. המצב הרגיל במים בצנרת.
צמיגות דינמית	dynamic viscosity · μ	ההתנגדות הפנימית של הנוזל לזרימה [Pa·s].
צמיגות קינמטית	kinematic viscosity · ν	צמיגות חלקי צפיפות: $\nu = \mu / \rho$. הנוסחאות ההידראוליות משתמשות בה.
איבוד עומד	head loss · h_f	אובדן אנרגיה לחיכוך לאורך צנרת ואביזרים. גדל עם ריבוע הספיקה.

עברית	ENGLISH	הגדרה
נוסחת דארסי	Darcy-Weisbach	חישוב איבוד חיכוך: $h_f = f \cdot (L/D) \cdot v^2 / (2g)$
נוסחת הייזן-וויליאמס	Hazen-Williams	חישוב אמפירי לאיבוד חיכוך במים, תלוי במקדם החספוס C.
איבוד אביזר	minor loss	איבוד מקומי במרפק, שסתום או הצרה: $h = K \cdot v^2 / (2g)$
עקום המערכת	system curve	העומד שהמתקן דורש מול ספיקה: $H = H_{static} + k \cdot Q^2$
עומד סטטי	static head	הפרש הגובה הקבוע שעל המשאבה להתגבר עליו, ללא תלות בספיקה.
נקודת עבודה	operating point	נקודת החיתוך בין עקום המשאבה לעקום המערכת. שם המשאבה פועלת בפועל.
פטיש מים	water hammer	גל לחץ חד שנוצר משינוי פתאומי במהירות הזרימה, למשל סגירת שסתום. הורס צנרת.

טבלה E.4 • ביצועים ועקומות (Performance & Curves)

עברית	ENGLISH	הגדרה
עקום מאפיין	characteristic curve	גרף העומד מול הספיקה (H-Q) של המשאבה במהירות נתונה.
עומד סגירה	shutoff head	העומד שהמשאבה מפתחת בספיקה אפס, מול מגוף סגור; הנקודה העליונה של עקום ה-H-Q.
עקום נצילות	efficiency curve	הנצילות מול הספיקה. שיאה הוא נקודת העבודה המיטבית.
עקום הספק	power curve	ההספק הנדרש מול הספיקה. עולה לרוב עם הספיקה.
נקודת עבודה מיטבית	best efficiency point • BEP	הספיקה שבה הנצילות מרבית. עבודה רחוק ממנה מקצרת חיי משאבה.
חוקי הדמיות	affinity laws	קשרי הקנה-מידה לשינוי מהירות: $Q \propto n$, $H \propto n^2$, $P \propto n^3$.
חיתוך מאיץ	impeller trimming	קיצוץ קוטר המאיץ כדי להנמיך את העקום בקביעות, במקום שניקה בשסתום.
מהירות סגולית	specific speed • Ns	מספר חסר-ממד המסווג גיאומטריית מאיץ: $N_s = n \cdot \sqrt{Q} / H^{0.75}$
זרימה רדיאלית	radial flow	מאיץ צר לעומד גבוה וספיקה נמוכה, Ns נמוך.
זרימה צירית	axial flow	מאיץ דמוי-פרופלר לספיקה גבוהה ועומד נמוך, Ns גבוה.
שניקה	throttling	הקטנת ספיקה בסגירת שסתום. מבזבזת אנרגיה, עדיף ממיר תדר.
טווח פעולה	operating range	תחום הספיקות שבו מומלץ להפעיל את המשאבה סביב ה-BEP.

עברית	ENGLISH	הגדרה
חוסר יציבות	surging / hunting	תנודות ספיקה ולחץ בעבודה בחלק עולה של העקום או בספיקה נמוכה מאוד.
הפעלה מקבילה	parallel operation	שתי משאבות או יותר שמזרימות יחד לאותו קו, מחברות ספיקות באותו עומד.
הפעלה טורית	series operation	משאבות בטור שמחברות עומדים באותה ספיקה, לעומדים גבוהים.

טבלה E.5 • קוויטציה ויניקה (Cavitation & Suction)

עברית	ENGLISH	הגדרה
קוויטציה	cavitation	היווצרות בועות אדים בצד היניקה והתמוטטותן האלימה במאיץ. שוחקת מתכת ומפילה ביצועים.
לחץ אדים	vapor pressure • pv	הלחץ שבו הנוזל רותח בטמפרטורה נתונה. עולה מהר עם החום.
NPSH זמין	NPSH available • NPSHa	עודף עומד היניקה שהמערכת מספקת מעל לחץ האדים. תכונה של המתקן.
NPSH נדרש	NPSH required • NPSHr	עודף עומד היניקה שהמשאבה דורשת כדי לא לקוות. תכונה של המשאבה, מהיצרן.
מרווח ביטחון	NPSH margin	ההפרש או היחס בין הזמין לנדרש. הכלל: $NPSHa \geq 1.3 \cdot NPSHr$
מספר תומא	Thoma number • σ	מנרמל את דרישת היניקה מול העומד: $\sigma = NPSHr / H$
מהירות סגולית יניקה	suction specific speed • Nss	מדד רגישות לקוויטציה ולרה-סירקולציה: $Nss = n \cdot \sqrt{Q} / NPSHr^{0.75}$
שחיקת קוויטציה	cavitation erosion	בלאי ספוגי על גב להבי המאיץ מקריסת מיליוני בועות. הנזק המכני של קוויטציה.
רה-סירקולציה	recirculation	זרימה חוזרת פנימית בספיקות נמוכות מאוד שמייצרת רעידות ונזק דמוי קוויטציה.
עליית יניקה	suction lift	מצב שבו המשאבה ניצבת מעל מפלס המים. מוריד את $NPSHa$.
הצפת יניקה	flooded suction	מצב שבו מפלס המים מעל המשאבה. מעלה את $NPSHa$, מצב מועדף.
פריימינג	priming	מילוי המשאבה וצנרת היניקה בנוזל לפני הפעלה. משאבה צנטריפוגלית לא שואבת אוויר.

טבלה E.6 • הנעה, חשמל ובקרה (Drives, Electrical & Control)

עברית	ENGLISH	הגדרה
-------	---------	-------

עברית	ENGLISH	הגדרה
מנוע השראה	induction motor	המנוע החשמלי הנפוץ למשאבות. מסתובב מעט לאט מהשדה המגנטי.
החלקה	slip	הפרש המהירות בין השדה המגנטי לרוטור. ממנה נובע המומנט.
מקדם הספק	power factor · cos φ	היחס בין הספק פעיל למדומה. נמוך מדי גורר קנס מחברת החשמל.
מתח גבוה / מ"ג	high / medium voltage	במים בישראל "מתח גבוה" של אתר הוא מ"ג, לא מתח עליון. רלוונטי לתעריף ולקנסות.
מתח נמוך / מ"נ	low voltage	מתח עד 1 kV. תחנות קטנות, תעריף אנרגיה גבוה יותר.
ממיר תדר	VFD · variable frequency drive	בקר שמשנה את תדר המנוע ולכן את מהירותו. חוסך אנרגיה לפי חוקי הדמיות.
מתנערך	soft starter	מתקן שמעלה את המתח בהדרגה בהתנעה. מקטין זרם פתיחה ופטיש מים, אך לא משנה מהירות בעבודה.
זרם התנעה	inrush current	הזרם הגבוה הזורם בעת התנעה ישירה של מנוע, פי כמה מהזרם הנקוב.
סוללת קבלים	capacitor bank	מתקן לתיקון מקדם הספק. אינו תחליף לממיר תדר, פותר רק את הקנס.
שסתום אל-חוזר	check valve	שסתום חד-כיווני שמונע זרימה לאחור בעצירת המשאבה ומגן מפני פטיש מים.
שסתום ויסות	control valve	שסתום שמכוון ספיקה או לחץ בקו, לרוב בשניקה.
בקר לוגי מתוכנת	PLC	מחשב תעשייתי קשיח המריץ לוגיקת בקרה בזמן אמת בתחנת השאיבה.
מערכת בקרה ואיסוף נתונים	SCADA	מערכת-על לניטור ושליטה מרחוק בתחנות שאיבה, מעל ה-PLC המקומיים.

טבלה E.7 • אחזקה, רגולציה וכלכלה (Maintenance, Regulation & Economics)

עברית	ENGLISH	הגדרה
דחף צירי	axial thrust	הכוח לאורך הציר שמקורו בהפרשי לחץ על המאיץ. נושאים אותו מסבים או תא איזון.
דחף רדיאלי	radial thrust	כוח רוחבי על הציר, חזק בעבודה רחוק מה-BEP. גורם לכפיפת ציר ולבלאי מסבים.
מהירות קריטית	critical speed	מהירות הסיבוב שבה הציר מהדהד. עבודה קרוב אליה מסוכנת לרעידות.

עברית	ENGLISH	הגדרה
ניטור מצב	condition monitoring	מעקב שוטף אחר רעידות, חום וביצועים לזיהוי תקלה בעודה מתפתחת.
רעידות	vibration	תנודות מכניות הנמדדות ב-RMS mm/s . עולות עם אי-יישור, חוסר איזון וקוויטציה.
אי-יישור	misalignment	סטייה בין ציר המנוע לציר המשאבה. גורם נפוץ לרעידות ולבלאי מסבים ואטם.
חוסר איזון	unbalance	פיזור מסה לא אחיד במאיץ. מייצר רעידה בתדר הסיבוב.
אחזקה חזויה	predictive maintenance	תזמון טיפול לפי מצב מדוד ולא לפי לוח זמנים קבוע. מונע השבתות מפתיעות.
בדיקת נצילות	efficiency test	מדידת ספיקה, עומד והספק לחישוב נצילות בפועל, לפי ISO 9906.
שיפוץ כללי	overhaul	פירוק ושיקום מקיף של המשאבה, החלפת מאיצים, טבעות שחיקה ומסבים.
קורוזיה	corrosion	בלאי כימי של חומר המשאבה. בוחרים סגסוגת לפי הנוזל.
שחיקה	erosion / abrasion	בלאי מכני מחלקיקים מוצקים בנוזל. נפוץ במים עם חול.
גוף מבוקר	controlled body	צרכן אנרגיה מעל סף רגולטורי שחייב ממונה אנרגיה ודיווח. מעל טון 300 שווה-ערך נפט.
סקר אנרגיה	energy survey	בדיקה תקופתית מחויבת מעל טון 1,250 שווה-ערך נפט, מזהה ומכמתת חיסכון.
תעודת יעילות	efficiency certificate	מסמך המתעד את נצילות המשאבה הנמדדת, לרוב עם קוד QR.
מדד נצילות מינימלי	MEI (minimum efficiency index)	מדד רגולטורי אירופי (תקנה 547/2012) לנצילות מינימלית של משאבות מים; הסף כיום 0.4.
עלות מחזור חיים	life cycle cost • LCC	סך הרכש, ההתקנה, האנרגיה והאחזקה לאורך חיי המשאבה. האנרגיה היא הרכיב הגדול.
החזר השקעה	payback	הזמן עד שהחיסכון השנתי מכסה את ההשקעה: השקעה / חיסכון שנתי .
ערך נוכחי נקי	net present value • NPV	סך תזרימי המזומנים מהוונים להיום. חיובי משמעו השקעה כדאית.
תעריף עומס וזמן (תעו"ז)	time-of-use tariff	תעריף חשמל המשתנה לפי שעה ועונה. הזזת שאיבה לשעות זולות חוסכת כסף.

איך להשתמש במילון

כשמדברים עם יצרן או ספק זר, השם האנגלי בעמודה האמצעית הוא השם שיופיע בקטלוג ובמפרט. כשכותבים דוח לקוח בעברית, מקפידים על אותו תרגום עקבי שמופיע כאן לאורך כל הספר. ההגדרה הקצרה היא לרענן מהיר, ההסבר המלא נמצא בפרק הרלוונטי. למונחי הנוסחאות, ראו את דף הנוסחאות המרוכז בנספח D.

F רשימות תיוג

Checklists

חמש רשימות מעשיות שמתמצות את לב הספר לכדי פעולה. צלם את העמודים, הדפס, וסמן בשטח. כל רשימה מפנה לפרק שבו הנושא נדון לעומק. הריבוע □ נועד לסימון ביד או בקובץ. אל תסמוך על הזיכרון. רשימה מסומנת היא ההבדל בין התקנה שעובדת שנים לבין תקלה שחוזרת.

F.1 • רשימת בחירת משאבה (Pump Selection)

לפני שמזמינים משאבה. רוב טעויות הבחירה עולות פי כמה לאורך עשר שנות תפעול מהפרש המחיר ברכישה. ראה פרק 17 (בחירת משאבה) ו-פרק 26 (עלות מחזור חיים).

☐ **נתוני נקודת התפעול נאספו** • ספיקה נדרשת Q ועומד H חושבו מעקום המערכת, לא הונחו מהזיכרון

☐ **טווח עבודה הוגדר** • לא רק נקודה אחת. Q_{max} , Q_{min} ונקודת הביקוש הרגילה

☐ **BEP קרוב לנקודת התפעול** • נקודת העבודה נופלת בטווח 80–110% מ- Q_{BEP} (לכל היותר 70–120%)

☐ **$NPSHa > 1.3 \times NPSHr$** בנקודה הגרועה ביותר • ספיקה מרבית, טמפרטורה גבוהה, מפלס מקור נמוך (פרק 15)

☐ **מנוע במידה נכונה** • הספק נקוב ≥ 1.15 • הספק הציר בנקודה הקיצונית. לא קטן מדי (חימום), לא גדול מדי ($\cos\phi$ ירוד בעומס חלקי)

☐ **דירוג נצילות מנוע** נבחר • IE3 מינימום, IE4 מומלץ להפעלה רציפה (פרק 26, מנוע פרמיום מחזיר את עצמו)

☐ **ממיר תדר נשקל** • אם הביקוש משתנה לאורך היממה או העונה, VFD חוסך בחזקה השלישית של המהירות (פרקים 14 ו-20)

☐ **חומר תואם לנוזל** • יצקת, ברונזה, נירוסטה או פלסטיק לפי מליחות, חומציות ומוצקים תלויים

☐ **אטם מכני תואם** לטמפרטורה, ללחץ ולנוזל. סוג, חומר ושיטת קירור

☐ **עקום היצורן התקבל ונבדק** • עקום H-Q, נצילות, $NPSHr$ והספק. לא רק טבלת קטלוג

☐ **בחירה לפי LCC** ולא לפי מחיר רכישה בלבד • אנרגיה היא כ-85% מעלות המחזור. הזול ברכישה הוא לרוב היקר לאורך זמן (פרק 26)

☐ **זמינות חלפים ושירות** בארץ אומתה · אטמים, מסבים, מאיץ ונציג מקומי

☐ **שוליים לעתיד** · האם הביקוש צפוי לגדול? עדיף משאבה עם רזרבה מבוקרת מאשר החלפה בעוד שנתיים

F.2 · רשימת הרצה והתקנה (Commissioning & Installation)

מהפריקה ועד ההפעלה הראשונה. רוב הכשלים המוקדמים נולדים כאן, בשעות הראשונות. ראה פרק 22 (התקנה, יישור והרצה).

☐ **יסוד יצוק והתקשה** · בטון מסיבי, פי 3–5 ממשקל הסט, התקשה במלואו לפני ההידוק

☐ **תושבת מוזקת ומפולסת** (grout) · חלל מתחת לבסיס מולא, פילוס אופקי אומת בפלס

☐ **יישור משאבה-מנוע בוצע** · קואקסיאלי וזוויתי, בשעון חוגה או לייזר, **בתנאי עבודה חמים**. תועד בכתב (פרק 22)

☐ **צנרת נתמכת בנפרד** · משקל הצנרת על תמיכות עצמאיות, לא על אוגני המשאבה. אין מאמצים על הגוף

☐ **צנרת יניקה נכונה** · מעבר אקסצנטרי (eccentric reducer) עם הצד הישר למעלה, קטע ישר של $5-10 \times$ קוטר לפני היניקה, ללא כיסי אוויר

☐ **אטימת אוויר נבדקה** בצד היניקה · חיבור דולף מכניס אוויר ומונע פריימינג

☐ **כיוון סיבוב אומת** · בדיקת "פעימה" (jog) קצרה לפני חיבור מלא. סיבוב הפוך נותן עומד נמוך וזרם גבוה

☐ **המשאבה מולאה ואווררה** (primed & vented) · אין הפעלה יבשה. ברז אוויר נפתח עד יציאת נוזל

☐ **שסתומים בסדר הנכון** · שסתום יניקה פתוח מלא, שסתום סניקה **סגור או מודרג** בהתנעה, נפתח בהדרגה

☐ **הגנות חשמל מכוילות** · עומס יתר (overload) לזרם הנקוב, הגנת ריצה יבשה, הגנת פאזה חסרה

☐ **מדידת בסיס נרשמה** (baseline) · זרם, מתח, $\cos\phi$, לחץ יניקה וסניקה, ורעידות בנקודות העבודה. זו נקודת הייחוס לכל אחזקה עתידית

☐ **ביצועים אומתו מול עקום היצרן** · H, Q ונצילות נמדדו ונמצאו בטולרנס ISO 9906 Grade 2 (פרק 24)

☐ **טמפרטורת מסבים ואטם** נבדקה אחרי ריצה · ללא חימום חריג. רעש ורטט תקינים

☐ **תיק מסירה נמסר** · עקום, גיליון נתונים, רשומת יישור ומדידת בסיס נשמרו לתחנה

F.3 · לוח אחזקה תקופתית (Maintenance Schedule)

מה לבדוק ובאיזו תדירות. התדירות מנחה. תחנה קריטית או נוזל שוחק מקצרים אותה. ראה פרק 23 (תפעול, אחזקה וניטור מצב).

טבלה F.3.1 · לוח אחזקה מונעת לפי תדירות

☐	משימה	תדירות	מה מחפשים
☐	סריקת חושים · רעש, רטט, דליפה, ריח	יומי	שינוי מול אתמול. האוזן מזהה תקלה לפני המכשיר
☐	זרם ולחץ · קריאת אמפר ומדי לחץ	יומי / שבועי	סטייה מהבסיס. עלייה בזרם או צניחת לחץ
☐	טמפרטורת מסבים ומנוע	שבועי	חימום חריג מעל 70°C, מגמת עלייה
☐	רעידות · מדידה במסב עליון ותחתון	חודשי / רבעוני	מול ISO 10816 / 20816. איזור A-B תקין, C-D פעולה (פרק 23)
☐	אטם מכני / אטם חבל · בדיקת דליפה	חודשי	דליפה גוברת, טפטוף קבוע, סימני שחיקה
☐	סינון ומסננים בצד היניקה	חודשי	סתימה. מסנן סתום מוריד NPSHa ומזמין קוויטציה
☐	סיכה · גירוז או החלפת שמן מסבים	רבעוני / לפי יצרן	מפלס, צבע וזיהום השמן. גריז לפי לוח היצרן
☐	בדיקת נצילות שדה (ראה F.4)	שנתי / לפי רגולציה	η ו-SEC מול הבסיס ומול הסף. כל 30 חודש לגוף מבוקר (פרק 24)
☐	בדיקת יישור חוזרת	שנתי	שקיעת יסוד, התרופפות עוגנים, זחילת צנרת
☐	חיזוק חיבורים חשמליים ובדיקת בידוד	שנתי	חיבור רופף = חימום והפסד. בדיקת התנגדות בידוד
☐	פירוק ובדיקה פנימית · מאיץ, טבעות שחיקה	לפי מצב / רב-שנתי	שחיקת קוויטציה, מרווחי טבעות שחיקה, בלאי גוף המשאבה
☐	החלטת שיפוץ / החלפה לפי NPV	בעקבות הבדיקה	ירידת η מעל שנה/2.5% או מתחת לסף → שקול שיפוץ (פרק 26)

F.4 · רשימת בדיקת נצילות (Efficiency Test)

בדיקת שדה לפי ISO 9906 Grade 2. כל סעיף הוא נתון או חישוב שבלעדיו אין דוח קביל. ראה פרק 24 (בדיקת נצילות בשטח).

- ☐ **מכשירים בתוקף כיוול** · מד ספיקה אולטרסוני, מדי לחץ ומנתח הספק. תעודות כיוול בתוקף
- ☐ **נקודת התקנת מד הספיקה תקינה** · קטע ישר מספיק במעלה ובמורד הזרם, צינור מלא
- ☐ **הספק חשמלי נמדד** · מתח U , זרם I ומקדם הספק $\cos\varphi$ בלוח. $\cos\varphi$ כשבר עשרוני (0.85, לא 85)
- ☐ **ספיקה נמדדה** Q בכל נקודה, ביחידות עקביות (m^3/h)
- ☐ **עומד יניקה וסניקה** · לחץ בשני הצדדים, עם תיקון גובה מד הלחץ מעל ציר המשאבה
- ☐ **סימני לחץ נכונים** · יניקה בוואקום נרשמת כשלילית. מפלס דינמי בבאר נרשם כשלילי
- ☐ **טמפרטורת נוזל נרשמה** · לתיקון צפיפות בנוזל חם או שפכים
- ☐ **בדיקה רב-נקודתית** · 5 נקודות לפחות, מפוזרות אחיד מספיקה נמוכה לגבוהה (6 מועדף)
- ☐ **P_1 והספק הידראולי חושבו** · $Ph = Q \cdot H / 367$, $P_1 = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \cos\varphi / 1000$
- ☐ **η כוללת ו-SEC חושבו** · $SEC = P_1 / Q$, $\eta = Ph / P_1 \cdot 100$ (3 ספרות אחרי הנקודה)
- ☐ **BEP זוהה** · נקודת הנצילות המרבית מתוך המדידות או מהתאמה ריבועית
- ☐ **השוואה לסף הרגולטורי** · $\geq 65\%$ משאבת קרקע / בוסטר, $\geq 55\%$ משאבת קידוח (פרק 24)
- ☐ **השוואה לעקום היצרן ולבסיס** · מגמת ירידה מול המדידה הקודמת מצביעה על בלאי
- ☐ **אי-ודאות הוערכה** · שילוב אי-ודאות המכשירים. תוצאה על הגבול דורשת מדידה מדויקת יותר
- ☐ **תעודה והמלצה הופקו** · דוח עם תאריך, תוצאות והחלטה: עומד / שיפוץ / החלפה / ממיר

F.5 · איתור תקלות מהיר (Quick Troubleshooting Index)

מהתסמין אל הבדיקה הראשונה. הטבלה לא מחליפה אבחון, היא מקצרת אותו. התחל מהבדיקה שבעמודה האמצעית, ועבור לפרק לעומק. ראה פרקים 15, 22, 24.

טבלה F.5.1 · אינדקס תסמין ← בדיקה ראשונה ← פרק

תסמין בשטח	בדוק קודם	פרק
------------	-----------	-----

תסמין בשטח	בדוק קודם	פרק
אין ספיקה כלל	כיוון סיבוב, פריימינג (אוויר כלוא), שסתום סגור, ריצה יבשה	24,21
ספיקה נמוכה מהנדרש	מאיץ שחוק או חסום, נזילת מעקף, מהירות נמוכה (VFD), עקום מערכת תלול מהמתוכנן	24,12
עומד נמוך / לחץ צונח	בלאי טבעות שחיקה, מאיץ שחוק, כיוון סיבוב הפוך, אוויר במערכת	24,22
רעש כמו חצץ / כדורים	קוויטציה. NPSHa נמוך: מסנן סתום, מפלס מקור ירד, ספיקה גבוהה מדי, נוזל חם	14
רעידות מוגברות	חוסר יישור, חוסר איזון מאיץ, בלאי מסבים, קוויטציה, ריצה רחוק מ-BEP	22
זרם / הספק גבוה מדי	ספיקה גבוהה מדי (ימינה מ-BEP), צפיפות נוזל גבוהה, חיכוך מכני, כיוון הפוך	24,23
נצילות נמוכה מהסף	בלאי מאיץ וטבעות, מנוע ישן (IE1), ריצה רחוק מ-BEP, cosφ ירוד	26,23
מנוע מתחמם / נופל בהגנה	עומס יתר (ספיקה גבוהה), פאזה חסרה, מתח נמוך, מסב תפוס, אוורור חסום	22,21
אטם מכני דולף	שחיקת אטם, יבש (ריצה ללא נוזל), חוסר יישור, רטט, חלקיקים בנוזל	22,21
מסב מתחמם / רועש	סיכה (יתר או חסר), חוסר יישור, עומס צירי, זיהום, בלאי	22
החמרה דווקא בקיץ	נוזל חם מוריד NPSHa, מפלס מקור ירוד, ביקוש שיא. בדוק קוויטציה	14
SEC עולה לאורך זמן	בלאי הדרגתי של מאיץ, ירידת מפלס מקור (עומד גובר), נצילות מנוע יורדת	25,23

איך משתמשים בריבוע

בהדפסה, סמן ✓ ביד וכתוב את הערך הנמדד לצד הסעיף. בקובץ, החלף □ ב-☑. שמור עותק חתום ומתוארך לכל תחנה. רשימה מתוארכת היא גם תיעוד אחזקה קביל מול הרגולטור וגם נקודת ייחוס לבדיקה הבאה.

סיכום הנספח חמש רשימות, כל מחזור החיים. בחירה נכונה, התקנה נקייה, אחזקה קבועה, בדיקה שיטתית ואבחון מהיר. תלה את חמשת העמודים האלה ליד תחנת השאיבה, ורוב מה שלמדת בספר יהפוך להרגל יומיומי. הידע ההנדסי שווה רק כשהוא הופך לפעולה חוזרת ומסומנת.