

שסתום אל חוזר והלם מים:

שסתום אל-חוזר (Check Valve) להלן שא"ח הוא אביזר מים נפוץ וותיק המותקן דרך קבע במורד משאבה במטרה למנוע חזרה של מים מקו הסניקה אל המאגר התחתון כאשר המשאבה מודממת. השא"ח משנה את מצבו כאשר המשאבה עוברת ממצב פעולה למנוחה או להפך.

הלם מים (SURGE) הוא שם כולל לתופעה של שינוי לחץ פתאומי הנובע משינוי חד במהירות זרימת המים בצינור, ועל כן קשור גם הוא לשינוי מצב של המשאבה, ולמעשה הדממה פתאומית ו/או בלתי מבוקרת של משאבה נחשב אחד מתרחישי ההלם השגרתיים יותר.

צימוד זה יחד עם העובדה ששינוי מהיר במצב חלקי השסתום עלול ליצור אימפקט מכני (SLAM) הגורר רעש של טריקה, הם כנראה הסיבה לקישור האינטואיטיבי בין שסתום אל-חוזר לתופעת ההלם שמשפיע חזק על שיקולי התכנון בכלל ועל שיקולי בחירת השסתום בפרט, ולא תמיד לטובה.

בהמשך ננסה לפתוח חלון אל תוך קישור זה, להבהיר את טיבו ולהציע כלים לשיפור מערכת השיקולים.

הלם מים נמדד כשינוי בלחץ ΔP המחושב כפרופורציה של שינוי מהירות הזרימה המחושבת (ספיקה נפחית חלקי חתך הזרימה) Δv . בסיס החישוב הוא משוואת שימור התנע של אוילר (EULER) בגבול שבו משך שינוי המהירות שואף ל 0 (שינוי פתאומי):

$$\Delta P = \rho \times (\Delta v \times C + \Delta v^2)$$

כאשר:

- ρ - צפיפות הנוזל (מסה ליחידת נפח)
- C - חפיזות גל ההלם בצינור שבו זורמים המים (במימדי מהירות)

• **חפיזות גל ההלם:** (מהירות הקול בזורם עם שקלול אלסטיות המעטפת)

$$C = \sqrt{\frac{1}{\rho \times \left(\frac{1}{E_f} + \frac{(D/e)}{E} \right)}}$$

צנרת פלסטיק : $C \approx 400 \text{ m/sec}$
צנרת פלדה : $C \approx 1200 \text{ m/sec}$

- E_f - מודול האלסטיות של הנוזל
- ρ - צפיפות הנוזל
- D - קוטר הצינור
- e - עובי הדופן של הצינור
- E - מודול האלסטיות של הצינור

בתרחישי ההלם הנפוצים של עצירת עמודת המים למהירות 0, שינוי המהירות שווה למהירות העבודה ההתחלתית, שבמערכות הולכת מים מעשיות היא בתחום 1 עד 3 מטר לשנייה. מאחר ומהירות מעשית זו קטנה בכ-2 עד 3 סדרי גודל ביחס לחפיזות גל ההלם, ניתן להזניח את האיבר Δv^2 במשוואת שינוי הלחץ, ולאחר המרה לממדי עומד מים מתקבלת נוסחת ז'וקובסקי (JOUKOWSKY) המתארת יחס ישר בין שינוי מהירות הזרימה לשינוי העומד (C, g קבועים)

$$\Delta H = \frac{C}{g} \times \Delta v$$

יש לזכור שחישוב זה מתייחס למקרה שבו משך שינוי המהירות שואף ל 0, דבר שאינו מתקיים במציאות. מכאן שהערך המחושב משמש גבול עליון והערכים בפועל נמוכים משמעותית.

תחת הנחה מחמירה של צנרת קשיחה יחסית (פלדה) בעלת חפיזות גל $C \approx 1000$ [m/sec], ולאחר עיגול תאוצת הגרביטציה $g \approx 10$ [m/sec²] מתקבלת נוסחת אצבע פשוטה עוד יותר לאומדן גבולות ההלם:

$$\Delta H [m] \approx 100 [sec] \times \Delta v \left[\frac{m}{sec} \right]$$

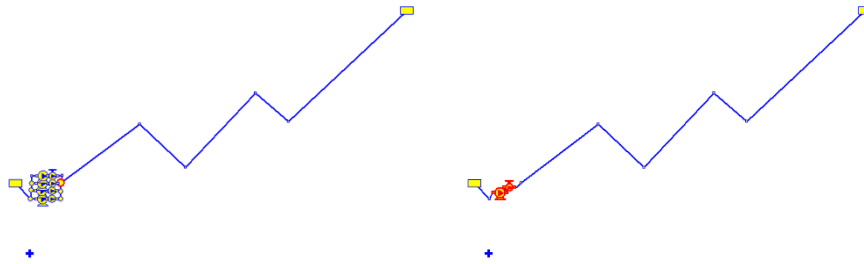
- בשלב ראשון נפריד בין מספר תופעות הלם מים הקשורות לתרחיש עצירה פתאומית או בלתי מבוקרת של משאבה הפועלת מול קו סניקה:
- א. הלם המים ישיר כתוצאה מהאטת עמודת המים במערכת הסניקה המתבטא בנפילת לחץ (DOWN SURGE) מהירה יחסית במורד המשאבה / השא"ח, שמתחילה לנוע אל המשך קו הסניקה בקצב חפיזות הגל C. במקרים שבהם עמודת המים בקו הסניקה מסתיימת בפני מים פתוחים לאטמוספירה כגון מיכל פתוח, **ורק בהם**, תנועת הגל נתקלת בלחץ האטמוספרי הקשיח ועל כן מוחזרת חזרה אל כיוון המשאבה בהיפוך פאזה כעליית לחץ מהירה (UP SURGE). ערכם המוחלט של שינויי לחץ אלה מוגבלים: ראשית על ידי הערך המחושב על פי מהירות הזרימה ההתחלתית, שבדרך כלל נמצאת בתחום של עד 3 מטר לשנייה, ושנית ע"י ההפרש בין לחץ הסניקה המוחלט המקסימלי לבין לחץ האדים של המים, שכן נפילת הלחץ, חזקה ככל שתהיה, לא תוכל לרדת אל מתחת ללחץ האדים ומכאן שגם עליית הלחץ העוקבת תוגבל.
 - ב. הלם מים עקיף כתוצאה מניתוק עמודת מים: במקרים שבהם נפילת הלחץ יורדת אל גבול לחץ האדים (או בשמו הפחות מדויק – וואקום מלא), נוצר קרע רגעי בין שתי עמודות מים, שבו המים הופכים לגז (VAPOR CAVITY) אשר בהיעדר מקור חום קורס חזרה ומתמלא במים בפרק זמן קצר מאד. עמודות המים הנעות למילוי חוזר של הקרע פוגשות זו את זו (או את מעטפת הצינור) במהירויות מאוד גבוהות, הרבה מעבר למהירויות הזרימה הסטנדרטיות, שכן הן מואצות בכיוון הצינור ע"י שילוב כוחות גוף (גרביטציה) וכוחות שטח (לחץ על המעטפת) בלתי מאוזנים. שילוב זה של שינויי מהירות חזקים ומהירים גורר הלמי מים חיוביים שבמקרים רבים עלולים להיות הרסניים לרכיבי מערכת המים. תופעה זו אינה מוגבלת לאזור מורד השא"ח, כי אם עלולה להתרחש גם באזורים שונים לאורך קו הסניקה בנסיבות שלא יפורטו כאן. יחד עם זאת קל מאד ומומלץ למנוע אותה באמצעות אביזרי הגנה כגון שוברי ואקום או שסתומי אוויר הנחוצים ממילא במקומות אלה מסיבות נוספות.
 - ג. הלם מים משני כתוצאה מפגיור סגירה של השא"ח: במערכת סניקה מקובלת שבה המשאבה מעלה מים מעומד נמוך לעומד גבוה, עצירת המשאבה גוררת האטה של עמודת המים בקו הסניקה עד עצירה, ומיידי **לאחר מכן האצה בכיוון ההפוך מהעומד הגבוה לעומד הנמוך**. כל עיכוב בסגירת השסתום ביחס לרגע העצירה יאפשר האצה של עמודת המים הנופלת חזרה, שתסתיים בסגירה פתאומית של השא"ח כנגד מהירות גבוהה. תופעה זו תגרור הלם מים משני שהוא למעשה הלם ראשוני חיובי של "מערכת אחרת" שבה גם מהירויות הזרימה וגם קצב הסגירה גבוהים בהרבה על כל המשתמע מכך.
 - ד. להשלמת התמונה יש להזכיר שקיימת גם תופעה הפוכה של הלם כתוצאה מסגירה מוקדמת של שא"ח **לפני** עצירת עמודת המים, במרבית המקרים עקב כוח הקפיץ של שסתומים דרוכי קפיץ. תופעה זו עלולה להחמיר מצבי ניתוק עמודת המים במורד השא"ח ו/או ליצור הלם חיובי בצנרת היניקה במקרים שזו קיימת. בדרך כלל מהירויות הזרימה כבר קרובות ל 0 במקרה זה, ועל כן עוצמת ההלם קטנה ולא נרחיב בו.

זה המקום להתייחס ולתקן ערבוב מוטעה גם אם נפוץ בין המושגים השגורים "חזרה של גל ההלם" ו"חזרה של עמודת המים" ולזכור שעמודת המים נעה בצנרת מעשית במהירות מסדר גודל מטרים בודדים לשנייה ונדרשת לזמני האצה ארוכים יחסית בעוד שגל ההלם / הפרעת הלחץ נע באותו המסלול במהירות של מאות מטרים לשנייה, ומכאן שאין ולא אמור להיות סינכרון בין תנועות אלה במצבים דינמיים.

ניתן לראות שתופעות ההלם הראשוני (א ו ב לעיל) כלל אינן קשורות להימצאות או לתפקוד השא"ח ועל כן לא נרחיב בהן כאן, אך יש צורך לבחון את תופעה ג - ההלם המשני.

לצורך הנוחות נפריד תחילה בין שני מקרים שהגבול ביניהם לא תמיד חד:
 א. מקרה א, אופייני למערכת סניקה של תחנת שאיבה אחת מול קו הולכה בשיפוע טופוגרפי קטן יחסית אל מאגר אטמוספירי עליון (איור 1).

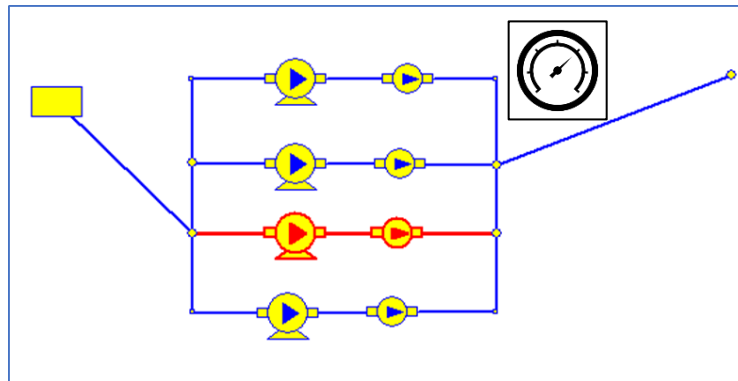
איור 1



במקרה זה הדממת התחנה משפיעה על מסת מים גדולה של כל המערכת, ועל כן תאוסת (DECELERATION) עמודת המים קטנה יחסית, מסדר גודל 0.1 עד 1 מטר לשנייה בשנייה, וכך גם האצה (ACCELERATION) בכיוון החוזר. במצב זה לשא"ח "יש זמן" להיסגר בסינכרון עם תנועת המים ולתפקד כשסתום אידאלי (המכונה גם Zero Velocity Valve) והגורמים לפיגור בסגירה הם מכניים בעיקרם וקשורים יותר באיכות השסתום ופחות בסוג השסתום. פיגור סגירה משמעותי במקרה זה יגרור שינוי תנע גדול - הלם ארוך וחזק שיתבטא בתנודה או רעידה של חלקי צנרת גלויים עד כדי נזק וכשל.
 ב. מקרה ב, אופייני למערכת של משאבה בודדת בתוך סדרה של משאבות מקבילות (איור 2).

מצב נפילת המשאבה במקרה זה, כאשר שאר המשאבות ממשיכות בפעולה ניתן לתיאור כאילו הלחץ הגבוה במניפולד הסניקה מפעיל כוח מחזיר על עמודת המים שבין שני המניפולדים.

איור 2

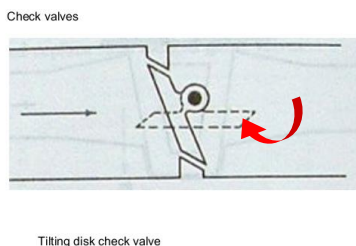


מאחר שבמקרה זה מסת המים קטנה והכוח גדול, התאוסה וההאצה מהירות מאד - סדר גודל 1 עד 10 מטר לשנייה בשנייה, והפיגור בסגירה מושפע גם מתכונות דינמיות של השסתום הקשורות לסוג השסתום. פיגור קטן בסגירה במקרה זה יתבטא ברעש טריקה שעלול ליצור מטרד רעש, ובמקרים קיצוניים גם לגרום נזק כגון שחרור ברגים. אפשר שהטריקה תלווה בעליית לחץ מקומית קצרה וחדה (SPIKE) שצפויה להתפזר במערכת בלא נזק.

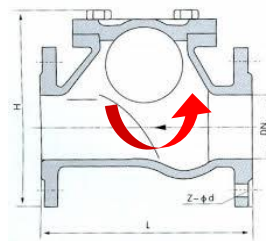
חשוב להכיר את הגורמים המכניים (היותר מסוכנים) לפיגור משמעותי בסגירה:

- א. כוח חיכוך כגון מרסן תנועה המחובר קשוח למדף, מפעיל הידראולי (בפרט אם הוא תקול), או סתם גוף זר כגון קורת עץ שנתקעה מתחת למשקולות ההאצה.
- ב. כוחות הידרודינמיים הפועלים להחזקת המדף פתוח גם בתחילת זרימה הפוכה. תופעה זאת נגרמת בדרך כלל בגלל טורבולנציה ו/או בגלל התפתחות חופש רב מדי בהגבלת תנועת המדף. תופעה זאת נפוצה יותר בשסתומים מסוג: BALL CV (איור 3), TILTING DISK CV (איור 4) ו SWING בפרט במקרים של התקנה אנכית.

איור 3



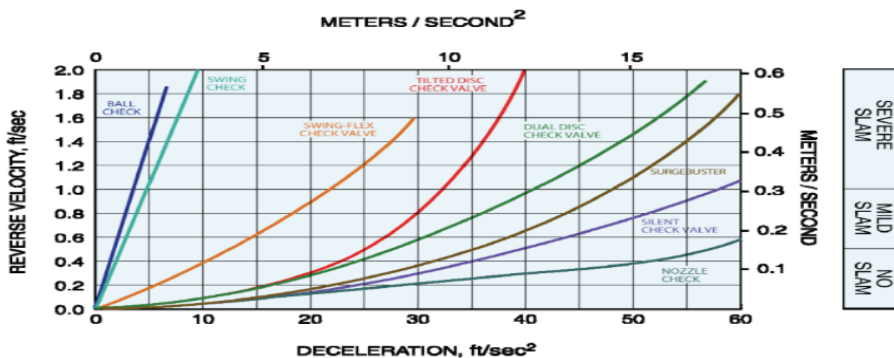
איור 4



- ג. כוחות חיכוך בציר התנועה (אורכי או סיבובי) תופעה זאת אינה זוכה לתשומת הלב הראויה (ולדוגמה יש דיווח של חוקר מהאוניברסיטה לטכנולוגיה וכלכלה של בודפסט, שעסק בהכנת מודל לסימולציה של תנועת המדף, והופתע לגלות חיכוך משמעותי בציר המדף שאילץ שינוי במודל) אך למעשה יש לה השפעה גדולה מכמה סיבות:
- נהוג מסורתית למסב את ציר המדף על מיסב חיכוך שרגיש מאד לאיכות הביצוע (טיב פני השטח ודיוק המידות), לקורוזיה, ולמוצקים מרחפים במים, ועל כן תפקודו יורד במהירות עם הזמן בפרט כאשר אין תוספת לובריקנט יזומה ואין טיפול מונע.
 - בדגמים עם ציר עובר דרך גוף השסתום (לצורך הרכבת משקולות, קפיצים, אינדיקציה לזרימה וכו') יש צורך באטימה מכאנית ויש רגישות לדליפות על כן מותקנת במרבית המקרים אטימת מכפס (STUFFING BOX) המתהדקת על הציר ולמעשה מגדילה בהרבה את החיכוך המתנגד לתנועה.
 - הפער בין מקדם החיכוך הסטטי לבין מקדם החיכוך דינמי גורר תנועה ב"קפיצות" המחמירה מאד את אפקט ההלם כאשר הציר "משתחרר" והמדף נסגר בגלל זרימה חוזרת שכבר צברה מהירות מספקת לשחרורו.
- בעיית החיכוך מוכרת בעיקר בשסתומים מסוג TILTING DISK CV שבהם קוטר הציר גדול יותר בגלל הצורך לשאת את העומס ההידראולי, ומומנט הסגירה המופעל ע"י משקל המדף יחד עם גרר הזרימה החוזרת, קטן יותר. מוכרים בארץ מספר שסתומים גדולים מסוג זה שבלאי המיסב "תקע" אותם ללא תנועה.

לצורך הערכת התאמת שסתום אל-חוזר במקרה השני קיים לכאורה כלי עבודה רשמי: **DYNAMIC BEHAVIORE OF NON_RETURN VALVE**

המופק ע"י בדיקת השסתום על מתקן יעודי, ומראה קשר בין קצב האטת עמודת המים לבין מהירות עמודת המים החוזרת הנעצרת ע"י השסתום ברגע סגירתו, פרופורציונית למידת הפיגור בסגירה. ומבוטא בדרך כלל בצורה גרפית כגון פרסום של יצרן אלחוזרים VAL-MATIC



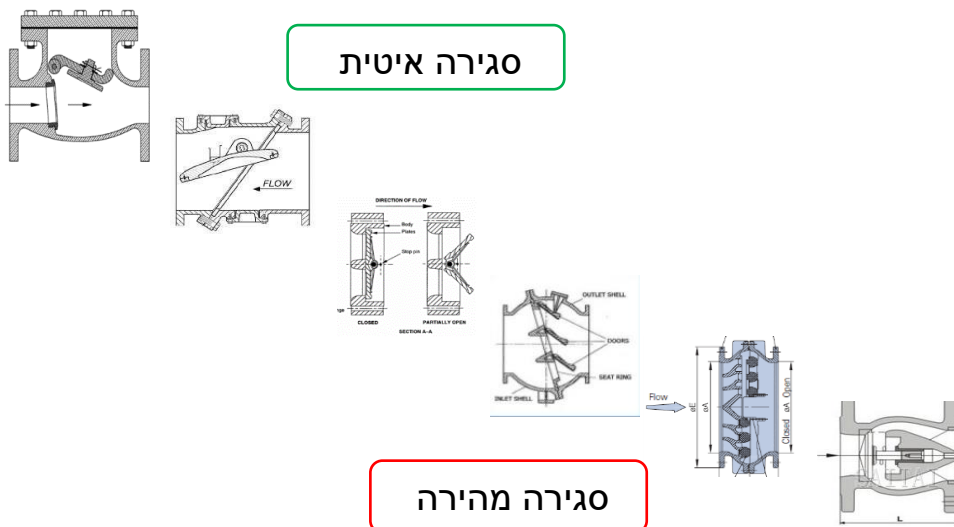
עיון במבנה מתקן הבדיקה ושיתת החישוב עלול להעלות תהייה על מידת הנכונות והתוקף של בדיקה זו, ובנוסף הוא אינו מתייחס כלל לנושא הפסדי האנרגיה ולשיקולי איכות נוספים, אשר על כן מומלץ מאוד לא להסיק מסקנות גורפות לגבי התאמה של סוגי שא"ח שונים מתרשים כגון הנ"ל.

יחד עם זאת, בהסתמך על ניסיונות שונים שבוצעו נמצאו קשרים הניתנים להסבר בין תכונות שונות של שא"ח כלשהו לבין ההתנהגות הדינמית שלו, שעיקרם:

- א. פיגור הסגירה קטן ככל שקטן מומנט האינרציה של המדף.
- ב. תנועה צירית עדיפה על תנועה סיבובית.
- ג. הוספת כוח קפיץ (או משקולות) לסגירה משפרת תגובה דינמית.

תובנות אלו גררו פיתוח דגמים המבטאים התאמות, כגון: קירוב ציר התנועה אל מרכז המסה של המדף, ריבוי מדפים קטנים במקום מדף גדול, הוספת קפיץ החזרה והקטנת אורך תנועת המדף. (איור 5)

איור 5



סגירה איטית

סגירה מהירה

חדי העין יוכלו להסיק מתרשימי החתכים באיור 5 שלכל השיפורים הנ"ל יש מחיר ביחס הפוך לשיפור, בדמות הגדלה משמעותית ביותר של התנגדות האביזר לזרימה, וכך גם בזבז האנרגיה (והכסף) הנלווה לה לאורך כל שנות הפעילות של המתקן. לדוגמא: הפסד העומד של שסתום מסוג Central guid כגון CLASAR® 12" בספיקה 800 מקש יהיה גדול בסדר גודל (פי 10) לעומת שסתום דגם SWING באותו הקוטר. המידע בנושא ההתנגדות לזרימה מוגש בדרך כלל ע"י היצרנים בצורות שונות, וחשוב להתייחס אליו.

כדאי גם לדעת שכלל שעולה גודל האביזר, גדל הפער בין הדגמים השונים, ויחד עם זאת קשה יותר לבדוק או לאמת את המידע.

רעש הטריקה עלול ליצור מטרד גם אם אינו מלווה בעלית לחץ משמעותית שכן אם המדף נסגר מספיק מהר, נוצר רעש, בפרט אם השסתום הוא בעל אטימה מתכתית או אלסטומר בעל קושי גבוה. להמחשה ניתן לחשב שמהירות מטר לשנייה, שוות ערך לנפילה אנכית של המדף על תושבת האטימה מגובה של כ 5 ס"מ. מכאן שיש מקום לפתרון בעיית הטריקה גם מהיבט הרעש וגם מהיבט הלם המים ע"י ריסון תנועת המדף **בסוף תנועתו**, במרחק הקטן ביותר האפשרי לפני הפגיעה בתושבת האטימה, שעדיין אפשר את ספיגת האימפקט, ויש היצע של דגמים הכוללים מנגנון כזה.

גם שינויי תכנון כגון **הגדלת מסת המים** (קוטר / אורך הצינור) שבין המניפולדים (זאת שהופכת כיוון) במקרים של חיבור משאבות במקביל האופייני למקרה ב' עשויים למתן או למנוע את תופעת הטריקה ללא תשלום בהפסדי אנרגיה.

מסקנות האפשרויות מהאמור לעיל הן:

- א. לנושא האיכות הטכנית, בעיקר בנושא המיסוב והאטימה יש משקל הרבה מעבר לאורך החיים הצפוי ולמתאם למחיר. למעשה הוא ראוי להיות השיקול הדומיננטי על אף שאין לו ביטוי מספק בהשוואה לשיקולים פיסיקליים והידראוליים המככבים בעבודות המחקר ובמאמצי הפיתוח של היצרנים.
- ב. ניתן לראות שיתכן דגם שסתום שימנע הلم במקרה של נפילת כח כללית בתחנת שאיבה, אך לא יתאים במקרה של נפילת יחידה בודדת מתוך סדרה ולהפך, על כן אין קריטריון בודד ופשוט לבחירה של שסתום אלחוזר, ומומלץ להימנע מהישענות על כללי אצבע ומוסכמות נפוצות.
- ג. הבנת המנגנונים הפיסיקליים מאפשרת טיפול או מניעת תופעות הלם בשלב התכנון, בנוסף או אפילו במקום השקעה בהתאמת השא"ח או אביזרים יעודים נוספים.
- ד. הגישה הנכונה יותר היא להכיר ולהתייחס לשיקולים הרלוונטיים (כולל עצם הנחיצות של השסתום במערכת מסוימת), להשקיע מספיק בחיזוי התנהגות המערכת כגון ביצוע סימולציות הלם, לפרוס את מגוון האפשרויות ולבחור את המתאימה ביותר.

רפי אגמי

הכותב הוא יועץ עצמאי בתחום הלם מים, אנרגיה, ובעיות זרימה במערכות מים.