



אוניברסיטת בן גוריון בנגב  
הפקולטה למדעי ההנדסה  
המחלקה להנדסת מכונות

**חקירת מערכת המשלבת מד ספיקה ונטורי  
ומד ספיקה Vortex למדידת זרימת Wet-Gas**

חיבור זה מהווה חלק מהדרישות

לקבלת תואר מגיסטר בהנדסה

מאת: אסף פורמוזה



אוניברסיטת בן גוריון בנגב  
הפקולטה למדעי ההנדסה  
המחלקה להנדסת מכונות

## חקירת מערכת המשלבת מד ספיקה ונטורי ומד ספיקה Vortex למדידת זרימת Wet-Gas

חיבור זה מהווה חלק מהדרישות  
לקבלת תואר מגיסטר בהנדסה

מאת: אסף פורמוזה

מנחים: פרופ' גבי בן דור  
פרופ' טוב אלפרין

_____ תאריך	_____ מחבר:
_____ תאריך	_____ מנחים:
_____ תאריך	_____
_____ תאריך	יו"ר ועדת מוסמכים: _____

## תקציר

זרימה רב פאזית היא הזרימה השכיחה ביותר הקיימת הן בטבע והן בתהליכי תעשייה שונים לכן ישנה חשיבות הנדסית גבוהה בחיזוי ספיקות מרכיבי הזרימה. כיום ניתן לחזות את מרכיבי הזרימה השונים עד רמת דיוק של  $\pm 20\%$ , בזרימות Wet Gas עד דיוק של  $\pm 10\%$ .

בעבודת זו נחקרו ביצועיהם האינדיבידואלים של מד הספיקה ונטורי ומד הספיקה Vortex בזרימת Wet Gas. בנוסף נחקרה מערכת למדידת זרימת Wet Gas המשלבת בין שני המכשירים. לצורך מטרה זו נבנתה מערכת ניסוי בקוטר 1" ובנוסף לנתונים אשר התקבלו ממערכת ניסוי זו נתקבלו גם נתונים מתאגיד אגר ממערכת ניסוי דומה בקוטר 4".

ניתוח התוצאות נעשה עבור ניסויים בהם איכות הזרימה גבוהה מ 50% מאחר ונמצא כי אות היציאה ממד הספיקה Vortex אינו סדיר וחסר משמעות בשבר גז מסי הקטן מ 50%. בניסויים שנערכו בלחצים גבוהים נמצא כי מקדם התיקון עבור הספיקה המתקבלת ממד הספיקה Vortex מתנהג בצורה פרבולית בהתאם לאיכות הזרימה כפי שאובחן במחקרם של Hussien and Owen (1991). מניסויים שנערכו בלחץ אטמוספרי נמצא כי מד הספיקה Vortex הספציפי בו השתמשנו אינו רגיש להופעת נוזל בזרימה.

מניסויים בהם איכות הזורם גבוהה מ 50%, נמצא כי הקורלציה של Chisholm (1967) מתארת בצורה טובה את הקשר בין הפרש הלחץ הדו פאזי לבין הפרשי הלחץ החד פאזיים בהנחת זרימה חד פאזית דרך מערכת המדידה.

החשובים עבור מכשירי המדידה האינדיבידואלים ועבור מערכת המדידה המשלבת בניהם נעשו על ידי מודל מתמטי שנכתב בעבודה זו, בנוסף נכתבה תוכנית המעריכה את שגיאת ביצועי המערכת בחיזוי הספיקות.

מתוצאות שהתקבלו ניתן להסיק כי ביצועי מערכת המשלבת בין מד ספיקה ונטורי לבין מד ספיקה Vortex מתדרדרים עם העלייה ביחס צפיפויות גז נוזל. עבור יחס צפיפויות גז נוזל גבוה ערך השגיאה גדול ומגיע עד ל 30% ואילו עבור עבודה ביחס צפיפויות גז נוזל נמוך השגיאה בערכי הספיקה הנה באותו סדר גודל של השגיאה של מכשירי המדידה האינדיבידואלים.

כיוון שמודל המשלב בין מד ספיקה ונטורי לבין מד ספיקה Vortex לא מסוגל לתפקד בכל טווח של יחסי צפיפויות גז נוזל, מומלץ להתחשב ביחסי הצפיפויות הצפויים בתכנון מערכת למדידת זרימה רב פאזית המשלבת בין שני המכשירים, זאת על מנת לקבל תוצאות משביעות רצון.

לסבתי שרה (ממה) זיכרונה לברכה.

## **תודות**

לפרופ' טוב אלפרין ולפרופ' גבי בן-דור על האמון, הסיוע וההנחיה.

ליורם אגר ולדוד פרחי מתאגיד אגר על העזרה ועל שיתוף הפעולה.

לצוות הטכני ובמיוחד לאיציק ממן ולאיליה זילברמן על הסיוע הטכני ועל העזרה המרובה.

לאבי יוסי, לאמי מלכה אשר כשמה כן היא וליפעתי.

תודה מיוחדת לחברי מרט קלוצ'קו על העזרה, ההנחיה ועל שעות אין ספור שהקדשת לי.

## תוכן עניינים

א	..... תקציר	
ב	..... תודות	
ה	..... רשימת איורים	
ה	..... רשימת טבלאות	
1	..... מבוא	1
3	..... שיטות מדידה בזרימה רב פאזית	2
4	..... טכניקות למדידת מהירות	2.1
8	..... מדידת הרכב הזרימה	2.2
10	..... שיטות מדידה עבור זרימת Wet Gas	2.3
15	..... מערכת הניסוי ומכשירי המדידה	3
17	..... בחירת מכשירי המדידה	3.1
17	..... קווי זרימה חד פאזיים	3.1.1
18	..... קו זרימה דו פאזית	3.1.2
19	..... קריאות ייחוס אוויר/מים	3.2
20	..... מכשירי המדידה	3.3
20	..... Positive displacement מד ספיקה	3.3.1
20	..... מדי לחץ	3.3.2
21	..... מדי טמפרטורה	3.3.3
21	..... מד ספיקה רוטמטר	3.3.4
22	..... Vortex מד ספיקה	3.3.5
23	..... מד ספיקה ונטורי	3.3.6
24	..... מערכת איסוף המידע	3.3.7
25	..... מהלך הניסויים	4
25	..... כיול מד הספיקה ונטורי	4.1
27	..... ניסויים דו פאזיים בלחץ נמוך	4.2
28	..... נתונים עבור זרימת Wet Gas בלחץ גבוה	4.3
30	..... ניתוח הנתונים	5
30	..... Vortex מד ספיקה	5.1
33	..... מד ספיקה ונטורי	5.2
36	..... חישוב הספיקות	6
37	..... בדיקת איכות התוצאות המתקבלות מהמודלים	6.1

37	תוצאות	6.2
41	אנליזה של השגיאה	7
45	סיכום ומסקנות	8
47	נספח א - הקורלציות של Chisholm ו Murdock	
50	נספח ב - מד ספיקה רוטמטר, עיקרון פעולה	
52	נספח ג - מד ספיקה ונטורי "1	
53	רשימת מקורות	

## רשימת איורים

- 15..... איור 1 : סקיצה של מערכת הניסוי.
- 16..... איור 2 : מראה כללי של מערכת הניסוי.
- 20..... איור 3 : מד ספיקה Positive displacement.
- 20..... איור 4 : מד לחץ.
- 21..... איור 5 : מד טמפרטורה.
- 21..... איור 6 : מד ספיקה רוטמטר.
- 22..... איור 7 : מד ספיקה Vortex.
- 23..... איור 8 : מד ספיקה ונטורי.
- 24..... איור 9 : מערכת איסוף המידע.
- 26..... איור 10 : מקדם הפריקה כתלות במספר ריינולדס.
- 28..... איור 11 : טווח הניסויים לחצים נמוכים.
- 29..... איור 12 : טווח הניסויים לחצים גבוהים.
- 32..... איור 13 : מקדם התיקון CF עבור זרימה בלחץ גבוה דרך מד הספיקה Vortex.
- 32..... איור 14 : מקדם התיקון CF עבור זרימה בלחץ נמוך דרך מד הספיקה Vortex.
- 34..... איור 15 : קביעת מקדם המודל עבור זרימה בלחץ גבוה דרך מד הספיקה ונטורי.
- 34..... איור 16 : קביעת מקדם המודל עבור זרימה בלחץ נמוך דרך מד הספיקה ונטורי.
- 38..... איור 17 : איכות תוצאות ערכי הספיקה הנפחית של הגז, לחץ נמוך.
- 39..... איור 18 : איכות תוצאות ערכי הספיקה הנפחית של הגז, לחץ גבוה.
- 40..... איור 19 : איכות תוצאות ערכי הספיקה הנפחית של הנוזל, לחץ נמוך.
- 40..... איור 20 : איכות תוצאות ערכי הספיקה הנפחית של הנוזל, לחץ גבוה.
- איור 21 : השגיאה היחסית בערך הספיקה המסית של הגז (לחץ נמוך), תחומה על ידי גבולות משוואה השגיאה (13).
- 43.....
- איור 22 : השגיאה היחסית בערך הספיקה המסית של הגז (לחץ גבוה), תחומה על ידי גבולות משוואה השגיאה (13).
- 44.....
- 51..... איור 23 : רוטמטר, מבנה פנימי.

## רשימת טבלאות

- 18..... טבלה 1 : טווחי עבודת מדי הלחץ המחברים בנקודות שונות במערכת המדידה.
- 38..... טבלה 2 : ביצועי מערכת למדידת זרימת Wet Gas המשלבת בין מדי הספיקה.

## 1 מבוא

זרימה רב פאזית הנה זרימה הטרוגנית עם שטח מגע מוגדר בין נפחי המרכיבים השונים, כאשר כל פאזה יכולה לייצג מצב צבירה או חומר שונה. רוב סוגי הזרימה הקיימים בטבע ורוב סוגי הזרימה המשמשים בתהליכי התעשייה השונים הנם רב פאזיות. סוגי זרימה אלו ניתן לפגוש במפעלי אנרגיה, תהליכים כימיים, שאיבת נפט מבארות והולכת נפט בצנרת, תהליכי קירור ותהליכים שונים בתעשיית המזון.

למדידת הספיקות השונות בזרימה הרב פאזית עניין מדעי וטכנולוגי רב. מבחינה טכנולוגית מדידה מדויקת ורציפה חיונית לבקרת תהליכים, לשיפור תהליכים, ולהפעלה חסכונית של יישומים תעשייתיים רבים כדוגמת כורים אטומיים, דודים, מערכות הפקת נפט גולמי, מערכות הפקת גזים טבעיים וכדומה הדורשים אפליקציות מתקדמות של שיטות למדידת זרימה רב פאזית.

זרימת נוזל-גז הנה זרימה נפוצה מאוד בתעשייה, בכלל, ובתעשיית הנפט, בפרט, בה משולב מגע מתמיד בין שמן, מים וגז. אי לכך קיימת חשיבות מרובה למדידת מרכיבי זרימה זו על מנת לאפשר את בקרת תהליך העבודה.

זרימת Wet Gas הנה זרימת גז בה משולבת כמות מועטה של נוזל. זרימת Wet Gas מהווה ענף נפרד בתחום הזרימה הרב פאזית וזאת משום שלא קיימת שיטת מדידה המסוגלת לכסות טווח מלא בזרימה הרב פאזית. השיטות המתקדמות ביותר למדידת זרימת גז-נוזל מתפקדות בצורה טובה בטווח של שבר גז נפחי אשר נע בין 0% ל 90%.

עד היום פותחו מספר רב של מערכות למדידת ספיקות מרכיבי הזרימה אך עדיין חוסר הוודאות בספיקות המרכיבים המחושבים בזרימת גז-נוזל מגיע ל 20% ועבור זרימת Wet Gas עד 10%. הרצון לייעל מערכות למדידת זרימה רב פאזית לא תמיד עומד עם הדרישות בבחירת מכשור מהיר, מדויק, קומפקטי וזול. דרישות אלו מערימות קשיים על תכנון מערכת מדידה יעילה המבוססת על המכשור הנבחר.

בעבודה זו נחקרת זרימת Wet Gas דו פאזית, נוזל-גז. מטרת עבודת המחקר הנה חקירת תפקוד מד ספיקה ונטורי ומד ספיקה Vortex בזרימת Wet Gas ופיתוח מודל המשלב בין שני המכשירים למדידת ספיקות מרכיבי הזרימה.



עבודת מחקר זו נעשתה בשיתוף עם תאגיד אגר, Agar Corporation (Houston, USA), אשר מתמחה בפיתוח מכשירי מדידה לבקרת תהליכים בתעשיית הנפט. קיימים שני שימושים לבקרת התהליכים בתעשיית הנפט, האחד הנו בדיקת תכולת/הרכב הנפט הנשאב מהבארות וזאת על מנת לתכנן תוכנית שאיבה אופטימלית מאותה הבאר. שאיבה לא מבוקרת עלולה לפגוע באיכות הנפט הגולמי ואף לייבש את הבאר. השימוש השני הוא לבקר את זרימת הנפט ממספר בארות שונים המנותבים למוביל נפט משותף וזאת בכדי לתגמל בצורה נכונה את בעלי הבארות השונים.

## 2 שיטות מדידה בזרימה רב פאזית

המטרה היא למדוד את ספיקות הפאזות השונות המרכיבות את הזרימה. שיטת מדידת הספיקה המדויקת ביותר היא הפרדת הפאזות השונות לקווי זרימה נפרדים ומדידת הספיקות השונות על ידי מכשור המשמש למדידת ספיקה חד פאזית. החיסרון בשיטת מדידה זו הוא כי לא ניתן לעקוב באופן רציף ובו בזמן אחר השינויים התכופים בשעורי הזרימה או בשברי הנפח של הפאזות השונות. מעקב רציף תוך כדי הזרימה חשוב מאוד בבקרת ובייעול תהליכים במערכות זרימה. מגבלה נוספת של שיטת מדידה זו היא כי יש צורך במכשיר מיוחד אשר ישמש להפרדת הפאזות, מכשיר כזה עלול להגדיל במידה ניכרת את השטח אותו תופסת מערכת המדידה. במקרים רבים לא ניתן מבחינה טכנולוגית להפריד את המרכיבים השונים בזרימה, לדוגמא הנוזל המקרר כורים גרעיניים, או שפשוט הפרדה שכזו אינה פרקטית מסיבות טכניות וכלכליות. אף על פי כן שיטה זו של הפרדת הפאזות משמשת באופן תדיר כשיטת ייחוס עבור כיוול שיטות מדידה מתוחכמות אשר בהן לא מתבצעת הפרדת הפאזות לקווי זרימה חד פאזיים נפרדים.

הבעיה העיקרית במדידת זרימה רב פאזית כאשר אין הפרדה בין הפאזות, הנה המגוון הרב של משטרי הזרימה השונים האפשריים (תצורות שונות של משטחי מגע בין הפאזות ומהירויות זרימה שונות של הפאזות) בהשוואה לזרימה החד פאזית, בנוסף לא קיים מודל אחד אשר מתאים לכל משטרי הזרימה דבר זה מגדיל את מספר הפרמטרים הרלוונטיים אותם יש למדוד בהשוואה לזרימה החד פאזית.

ניתן להתגבר על הבעיות הקשורות במשטרי הזרימה על ידי ערבוב הזורם ויצירת תערובת הומוגנית ויציבה. וכך ניתנת האפשרות להתייחס ולטפל בזרימה רב פאזית הומוגנית כזרימה חד פאזית בה הזורם הנו בעל תכונות פיזיקליות אקוויוולנטיות. כך ניתן להשתמש במכשירי מדידה חד פאזיים קונבנציונאליים ובנוסחאות החישוב עבורן עם תיקונים מעטים. בנוסף קל בהרבה לכייל מכשור המשמש למדידת זורם הומוגני זאת מכיוון שאין תנודות באות המוצא ממכשירי המדידה. אך שימוש בשיטה זו מוגבל במספר חסרונות משמעותיים דוגמת מפל הלחץ הגדול דרך המכשיר המערבב את הזרימה ואי היכולת לכסות בשיטה זו את כל טווח משטרי הזרימה. פרט לכך, באפליקציות רבות לא ניתן להוסיף מכשור נוסף (מערבל) או שיש צורך לבצע מדידות במצב הזרימה הטבעי. יש לציין כי זרימה אשר עורבבה והנה הומוגנית הנה בעלת נטייה להיפרד וזאת עקב השוני בין צפיפויות הזורמים, זרימה זו תהפוך להטרוגנית מרחק קצר לאחר היציאה מהמערבל. מסיבה זו יש למקם את מכשיר המדידה מייד לאחר המערבל.

דרך נוספת, לא ישירה, לקבלת ספיקות הפאזות המרכיבות את הזרימה הרב פאזית הנה מדידת פרמטרים שונים המאפיינים את הזרימה והצבתם במודל המקשר בינם לבין ספיקות הפאזות.

מספר מכשירי המדידה הדרושים למדידת זרימה רב פאזית הנו כמספר הפאזות המרכיבות את הזרימה. לרוב, המכשור בו משתמשים בשיטות לא ישירות למדידת שברי הספיקה השונים (לא ניתן למדוד בצורה ישירה את ספיקות המרכיבים השונים), מהווה שילוב של מכשור למדידת

מהירות הזורם ומכשור למדידת הרכב התערובת. לעיתים על מנת לחשב את המאפיינים הבסיסיים של הזרימה, קרי המהירות והשבר הנפחי של הפאזות יש צורך למדוד מאפיינים משניים דוגמת צפיפויות, צמיגויות ומאפיינים פיזיקליים שונים של המרכיבים השונים. כיוון שלרוב מדידה ישירה של פרמטרים אלו אינה אפשרית, יש לבצע מדידה עקיפה של פרמטרים כדוגמת הלחץ והטמפרטורה ולהשתמש במודלים המתארים את הקשר בין הפרמטרים השונים. בהמשך נסקרים שיטות מדידה שונות המשמשות למדידת ספיקות המרכיבים השונים בזרימה רב פאזית.

קיים קושי בכיול מכשירי המדידה בהם משתמשים בזרימה רב פאזית זאת עקב השינויים התכופים בזרימה הרב פאזית, קרי שינויים במהירויות ושעורי הזרימה של הפאזות. כך שבניגוד לזרימה חד פאזית, בזרימה רב פאזית אין משמעות לקריאות הרגעיות (המשתנות ללא הרף). לכן הכיול מתבצע על פי נתונים ממוצעים מסדרות של דגימות. בדרך כלל כיול הפרמטרים נעשה במערכת מעבדתית כנגד שעורי הזרימה של הפאזות השונות בקווי זרימה חד פאזיים נפרדים. קיים מגוון רב של שיטות ומכשירי מדידה עבור מדידת זרימה רב פאזית. בחירת שיטת המדידה המתאימה נקבעת על פי דרישות האפליקציה הספציפית, דוגמת דרישות הנובעות ממגבלות טכניות וכלכליות, יישום, בטיחות, התכונות הפיזיקליות אותן יש למדוד, משטרי הזרימה השכיחים, מגבלות מקום וכדומה.

## **2.1 טכניקות למדידת מהירות**

מדידת המהירות בזרימה רב פאזית נעשית בדרך כלל על ידי מכשירים המשמשים למדידת זרימה חד פאזית דוגמת מכשירים למדידת הפרשי לחץ, Turbine meter, Positive displacement (PD) meter, וכדומה. פרוש התוצאות בעזרת מכשור זה אינו מיידי וזאת עקב הבדלי המהירויות בין הפאזות. ניתן להתגבר על בעיה זו על ידי מערבול הגורם ליצירת תערובת הומוגנית ומהירות זרימה אחידה, על ידי כך המהירות הממוצעת של הזורם מתקבלת באופן ישיר על ידי מכשיר המדידה. כיוון שלא תמיד ניתן להוסיף מערבול לזרימה, משתמשים בטכניקה ומכשור המשמשים למדידת זרימה חד פאזית בשילוב מערכת המקשרת בין קריאות מכשירי המדידה לספיקות המרכיבים. כאשר משתמשים במכשירים למדידת מהירות המגיבים לשינויים בשטף התנע ולא לשינויים בשטף הנפחי, דוגמת מד ספיקה ונטורי, על מדידת המהירות להשתלב עם מכשיר מדידה נוסף המשמש למדידת הרכב התערובת וזאת על מנת לקבוע את צפיפות התערובת.

מדידת המהירות על ידי מכשור למדידת הפרש לחץ

מד ספיקה נחיר אוריפיס, מד ספיקה ונטורי ומד ספיקה נחיר מתכנס הנם המכשירים בהם משתמשים באופן תדיר לחישוב מהירות/ספיקה בזרימות רב פאזיות וזאת הודות למחירם הנמוך ולאמינותם הגבוהה. במכשירים אלו טכניקת המדידה מתבססת על הצרת שטח חתך הזרימה, על ידי כך הזורם מאיץ וכתוצאה מכך נוצר מפל לחץ. בזרימה חד פאזית הקשר בין הפרש הלחץ הנמדד לבין הספיקה מתקבל ישירות ממשוואת שימור האנרגיה:  $Q = C\sqrt{\Delta P/\rho}$ . המקדם C תלוי בגיאומטריית המכשיר והפסדי החיכוך הקשורים בה. אחת הבעיות העיקריות בשימוש במכשיר מסוג זה למדידת זרימה רב פאזית נוזל-גז הנה שהגז מאיץ מהר יותר מהנוזל במעבר דרך מכשיר המדידה ועקב כך ניתוח התוצאות אינו חד משמעי. קיים שימוש נפוץ בקורולציות אמפיריות המקשרות בין מפל הלחץ דרך מד ספיקה ונטורי לבין שעורי הזרימה של הפאזות. הקורולציה הפשוטה ביותר מושגת על ידי המשוואה החד פאזית, כאשר בנוסחה עבור ערך הצפיפות מציבים את ערכה של צפיפות התערובת והוספת תיקון אמפירי למקדם הפריקה, דוגמא לשימוש בקורולציה זו הנה עבור מערכת מדידה המשלבת מערבול ליצירת תערובת הומוגנית. גישה נוספת מקשרת בין מפל הלחץ של הזרימה הדו פאזית למפל הלחץ אשר היה מתקבל עבור כל פאזה הזורמת בנפרד דרך מכשיר המדידה. קיימות מספר קורולציות חצי אמפיריות מסוג זה (Murdock 1962, Chisholm 1967, Lin 1982).

יש לציין כי כאשר משתמשים במד לחץ עבור זרימת קיטור בה הגז מעובה במעט נוזל ושתי הפאזות מצויות בשיווי משקל תרמודינמי או בזרימה רב פאזית בה אחת הפאזות מומסת בפאזה אחרת דוגמת זרימת נפט-גז טבעי, שינויים גדולים בלחץ הנובעים מהמעבר דרך מכשיר המדידה עלולים לגרום למעבר מסה אשר משנה את שעור הספיקה הנפחי של התערובת וכך גם את מעבר התנע בין הפאזות, לכך יש להתייחס בניתוח מדידת מפל הלחץ דרך המכשור (Carofano & McManus 1969, Elperin et al. 2002).

חסרונו העיקרי של מד ספיקה נחיר אוריפיס וכן של מד ספיקה נחיר מתכנס באפליקציות עבור זרימה דו פאזית נובע מכך שמכשירים אלו גורמים להפרעה גדולה לזרימה ולהיווצרות מפל לחץ גדול. במד ספיקה ונטורי הן ההצרה והן התרחבות שטח החתך במכשיר המדידה הן מתוננות, לכן הזרימה דרך המכשיר חלקה בהרבה. מסיבה זו נעשה שימוש נרחב במד ספיקה ונטורי עבור מדידת זרימת גז-נוזל במגוון רב של יישומים בתוספת למכשירים המשמשים למדידת מהירות או למדידת השבר הנפחי של הזורמים.

מדידת המהירות על ידי Rotating Flow Machines

בזרימה חד פאזית המהירות הזוויתית של ה Turbine meter הנה פרופורציונלית לשטף הנפחי של הזורם  $\omega = \lambda Q = \lambda W/\rho$ , כאשר  $\lambda$  הנה מקדם הזרימה עבור ה Turbine meter. הגישה הפשוטה לניתוח תוצאות המדידה היא להניח כי ניתן לקבל בצורה ישירה את השטף הנפחי של הפאזות מהמשוואה החד פאזית בעזרת מקדם תיקון אמפירי למקדם  $\lambda$  (Ogawa et al. 1998).

גישה אלטרנטיבית הנה לפתח מודל המקשר בין המהירות הזוויתית של המנוע לבין מעבר התנע בין הלהבים לבין כל אחת מהפאזות הזורמות (Aya 1975, Kamath & Lahey 1980).  
 The true mass flow meter (TMFM) שונה מה Turbine meter בכך שהמנוע שלו מסתובב במהירות זוויתית קבועה, כאשר התנע הזוויתי המופעל על ידי הזורם פועל על הסטטור והנו פרופורציונלי לשטף המסי הכולל של הזורם. שיטה ישירה למדידת השטף המסי הנה יעילה בזרימות בהן מתרחש מעבר מסה, זרימות דוגמת הרתחה בהן השטף הנפחי וכתוצאה מכך מהירויות הפאזות משתנים. (Reimann et al. (1982) טענו כי ה TMFM הנו המכשיר היחיד המסוגל למדוד שטף מסי דו פאזי ללא תלות במשטר הזרימה. אך שימוש במכשיר זה דורש עיצוב מכני מורכב, זאת במטרה למנוע אי וודאות היכולה לנבוע מהפרדת הפאזות ביציאה ממכשיר המדידה.

Positive displacement (PD) meter מודד את שטף הזרימה על ידי חלוקה רציפה של הזורם לקטעי נפח ידועים וזאת על ידי רוטור מיוחד המעוצב למטרה זו. השטף הנפחי הכולל פרופורציונלי למהירות הסיבוב של הלהבים המוקנת להם על ידי הזורם. מכשיר זה מאוד מדויק הודות לשיטת מדידה מיוחדת זו, אינו רגיש למשטרי הזרימה ואינו סובל מהפרעות הנובעות מתופעות התקנה (דוגמת אורך צינור כניסה קצר).

החיסרון המשמעותי של מכשירים העובדים בעקרון פעולה זה (Rotating flow machines) נובע מכך שהם כוללים חלקים נעים וביצועיהם עלולים להיפגם מלכלוך מצטבר או מבילאי של אותם חלקים. בנוסף מכשירים אלו גורמים להפרעה בזרימה, יוצרים מפל לחץ גדול ועלולים לשנות את מבנה הזרימה. לעיתים אף משתמשים בהם על מנת ליצור תערובות זרימה הומוגניות. ה Turbine meter וה TMFM מאוד רגישים לתופעות מעבר מהירות כדוגמת הופעת Slugs (זרימת נוזל בה מופיעות בועות אויר גדולות בצורת קליע) המקשות על פרוש האותות הנקלטים. לעומתם חסרונו הגדול של ה PD meter הוא כי הוא עלול להינזק במהירויות זרימה גבוהות.

#### מדידת מהירות על ידי שיטת הצלבת מידע, Cross-Correlation Technique

שיטת הצלבת המידע עובדת על עיקרון של הצבת כל שני גלאי תנודות זהים של כל סוג תכונות דוגמת מוליכות חשמלית, צפיפות וכדומה (Beck & Plaskowski 1987). את הגלאים מציבים במרחק ידוע לאורך הזרימה ועל ידי התאמה בין האותות הנדגמים מתקבל משך הזמן בו גלי הזרימה עברו את המרחק הידוע בין הגלאים ומכאן ניתן לחשב את המהירות.  
 כאמור שיטת הצלבת המידע בודקת את הזהות בין שני אותות  $x(t)$  ו  $y(t)$  כאשר האות הנקלט במעלה הזרימה מעוכב בזמן  $\tau$ , ונתונה על ידי הנוסחה הבאה:

$$R_{xy}(\tau) = \frac{1}{T} \int_0^T x(t-\tau)y(t)dt, \quad (1)$$

כאשר  $T$  הנו זמן הדגימה. אם המרחק  $L$  בין הגלאים ידוע מהירות הזורם מתקבלת מהמשוואה הבאה:  $u = L/\tau_m$ . הנו משך זמן מעבר האות בין שני הגלאים אשר עברו פונקציית הצלבת המידע הנה בשיאה. שיטה זו דורשת כי התנודות באותות הנדגמים יהיו מוגדרות היטב ושלא ישתנו בצורה משמעותית בין נקודות המדידה. אי לכך שיטה זו מתאימה מאוד עבור זרימה בצורת בה תנודות בזרימה מתרחשות עקב המצאות פאזה נוספת. תכונה איכותית נוספת לשיטה זו הנה העובדה כי שינוי בתכונות הפיזיקליות של הזורמים, כגון הטמפרטורה, לא משפיע על טכניקה זו.

אך עבור זרימת גז-נוזל המהירות המתקבלת על ידי טכניקת מדידה זו אינה מייצגת לא את המהירות הממוצעת של הזורם ואף לא את מהירות אחת הפאזות. המהירות יכולה להיות גבוהה או נמוכה מהמהירות הממוצעת של הזרימה והיא תלויה במשטר הזרימה. שתי שיטות קיימות להקטנת תלות שיטת הצלבת המידע במשטרי הזרימה. אחת השיטות הנה ערבוב הזורם ויצירת תערובת זרימה הומוגנית ועל ידי כך מדידת המהירות הממוצעת של הזורם. שיטה אלטרנטיבית היא הצבת שני צמדי גלאים כך שאחד ימדוד את מהירותן של הבעות הגדולות המצויות בזורם אשר ניתן לקשרן למהירות הפאזה הגזית ואילו הצמד השני ימדוד את מהירותן של הבעות הקטנות המייצגות את מהירות הפאזה הנוזלית.

אף על פי הקשיים הכרוכים בפרוש התוצאות, שיטת הצלבת המידע הנה השיטה השכיחה ביותר בשימוש על ידי מכשור מסחרי למדידת זרימה רב פאזית (Milington 1997), חלק מכך בזכות חומרת המחשוב היעילה הקיימת המשמשת לחישובים מהירים ויותר מכך מהסיבה שבנוסף לחישוב המהירות ניתן להשתמש בקריאות מכל אחד מצמדי הגלאים על מנת למדוד את הרכב הזרימה.

#### מדידת המהירות על ידי Oscillatory Meters

כאשר זורם, זורם דרך גוף המוצב במורד הזרימה, ערבולים מתחילים להיווצר על חלקו האחורי של הגוף. ערבולים אלו גדלים עד למצב בו הם ניתקים לסירוגין משני קצוות הגוף ויוצרים שני טורים של ערבולים בעלי כיוון סיבוב הפוך במורד הזרימה, הנקראים רחוב המערבולות של וון קרמן (von Karman Vortex Street). מדי הספיקה Vortex משתמשים באפקט זה למדידת זרימה חד פאזית וזאת כיוון שמספר סטרול (Strouhal No.) המייצג תדירות בלתי ממדית של הערבולים הניתקים מגוף ה Vortex הנו קבוע עבור טווח רחב של מספרי ריינולדס. תגובת מד הספיקה Vortex אינה תלויה לא בצפיפות ולא בצמיגות הזורם. בנוסף ביכולתם של מדי הספיקה Vortex למדוד את צפיפות הזורם וזאת מאחר ומספר אויילר, Euler, המייצג את התנודות בלחץ כנגד תדירות התנתקות מגוף ה Vortex גם כן קבוע.

Hulin et al. (1982) בחנו בצורה ניסויית את תדירות התנתקות הערבולים בזרימת בעות אוויר-מים. נמצא כי בשבר גז נפחי הנמוך מ 10%, ערבולים ניתקים בתדירות ברורה כאשר מספר סטרול המבוסס על מהירות הפאזה הנוזלית גדל במעט כפונקציה של השבר הנפחי בלבד. עבור שברי גז נפחיים גדולים יותר תהליך התנתקות הערבולים הופך לבלתי סדיר. במחקר דומה עבור זרימת

נוזל-נוזל (Foussat & Hulin 1984) הראו כי מד הספיקה Vortex מגיב בצורה ליניארית לשטף הזרימה הכללי בטווח רחב של ספיקות ועבור כל טווח שבירי הנפח של הפאזות המרכיבות את הזרימה.

יישום נוסף עבור מד הספיקה Vortex הנו מדידת המהירות בזרימת Wet Gas כאשר תגובת המכשיר ניתנת לתיקון על ידי פקטור הקרוב לאחד חלקי השורש הריבועי של השבר המסי של הגז (Hussein & Owen 1991).

## 2.2 מדידת הרכב הזרימה

כיוון שלא הפרדת הפאזות לא קיימת אפשרות לקבלה ישירה של שבירי הפאזות בזרימה רב פאזית נקבעים שבירי הפאזות, בין אם הנפחיים ובין אם המסיים על ידי מדידת תכונות פיזיקליות של התערובת. מדידה זו דורשת שתכונות הפאזות תבדלנה בצורה משמעותית זו מזו. בדרך כלל בזרימות רב פאזיות, אכן תכונות הפאזות נבדלות זו מזו (תכונות דוגמת צפיפות ומאפיינים חשמליים כגון קיבול והולכה). ניתן להעריך את שבירי הפאזות על ידי שידור קרניים אלקטרו מגנטיות דרך מערכת הזרימה, בדיקת האות הנקלט והשוואת עוצמתו לעוצמת האות המשודר. בשיטה זו נעשה שימוש במגוון רחב של גלים כדוגמת קרני גמה או קרני X. שיטת מדידה אחרת מתבססת על החדרת גלאים חשמליים לתוך הזורם אשר מודדים בקרבתם את מוליכות/קיבול הזורם.

### שידור וקליטת קרניים, Gamma and X Rays

עקרון הפעולה של מכשירים אלו מתבסס על האינטראקציה בין הקרינה האלקטרו מגנטית לבין החומר. כאשר אלומה מרוכזת של קרני X או קרני גמה משודרת דרך המערכת, עוצמת האלומה דועכת בצורה אקספוננציאלית. מקדם הדעיכה תלוי בצפיפות החומר דרכו עוברת האלומה וברמת האנרגיה בה שודרה האלומה. עוצמת האלומה, I, הנקלטת לאחר המעבר דרך המערכת המכילה זרימה רב פאזית הנה:

$$I(E) = I_0 B(E) \exp \left[ -L \sum_{(i)} \varepsilon_i \mu_i(E) \right], \quad (2)$$

כאשר  $I_0$  היא עוצמת המקור ברמת אנרגיה E.  $\mu_i$  הוא מקדם הדעיכה הליניארי של פאזה i התלוי בצפיפותה של הפאזה. L הנו אורך האינטראקציה, לדוגמה בזרימה בצורת L שווה לקוטר הפנימי של הצנרת,  $\varepsilon_i$  הנו השבר הנפחי של פאזה i. B הנו פקטור קבוע הלוקח בחשבון את ספיגת הקרניים בדפנות מערכת ספציפית. ממשוואה (2) ניתן לקבל את צפיפות המערכת וזאת על ידי מדידת הדעיכה של האות המשודר. כאשר צפיפויות המרכיבים ידועות ניתן להעריך את

השבר הנפחי שלהן. החיסרון בשיטה זו הוא שהשיטה אינה יעילה עבור זרימה הטרוגנית, זאת משום שהיא בודקת את הדעיכה לאורך אלומת השידור בלבד ולא לכל שטח החתך. אי לכך עבור זרימה הטרוגנית יש להשתמש במודל מתמטי או לפתח קורלציות נפרדות עבור משטרי זרימה שונים. ניתן להתגבר על בעיה זו על ידי שידור מספר אלומות מסביב להיקף כולו וקליטה רציפה של האותות וכך לקבל במישרין את צפיפות התערובת.

בניגוד לקרני הגמה הדורשים מיגון בעבודה עמן קרני ה-X בטיחותיים יותר. בנוסף שימוש בקרני ה-X חסכוני יותר כיוון שניתן לנתקם בין המדידות, אך קרניים אלו פחות יציבות מקרני הגמה. לכן ברוב היישומים התעשייתיים משתמשים בקרני גמה ואילו בקרני X משתמשים בדרך כלל בניסויים מעבדתיים. כעיקרון שימוש בקרני גמה אינו גורם להפרעה למהלך הזרימה ומהווה שיטה יעילה למדידת הרכב הזרימה, בשיטה זו משתמשים באופן תדיר במדידות מסחריות של זרימה רב פאזית (Dykesteen 1992, Fischer 1994).

#### מדידת אופיינים חשמליים של הזורמים

במקרים רבים של זרימה רב פאזית, לפאזות השונות מאפיינים חשמליים (קיבול והולכה) הנבדלים בניהם בצורה משמעותית. על ידי החדרת גלאי (אלקטרודת מחט) ומדידה רציפה ניתן לזהות מהי הפאזה הנמצאת בסביבת האלקטרודה (על ידי קבלת אות בינארי שונה עבור פאזה שונה), החיסרון הנו בכך שלא ניתן לדעת את הרכב הזורם אלא רק את הפאזה בסביבת הגלאי ומכאן לקבל רק הערכה לגבי הרכב הזורם בנקודת המדידה. על ידי גלאי הנע לאורך הרדיוס ניתן להתגבר על בעיה זו, אך גלאי כזה מפריע בצורה משמעותית לזרימה ואף עלול לשנות את שטח המגע בין הפאזות. דרך להתגבר על בעיה זו הנה הצבת מספר גלאים לאורך ההיקף. קיים מגוון רחב של גלאים המתוכננים בצורות וגדלים שונים כך שהפרעתם לזרימה תהיה מינימלית (ראה ב Coney 1973 and Koskie et al. 1989). בנוסף יש לציין כי כאשר הזרימה הטרוגנית גלאים אלו מושפעים לא רק מסביבתם הקרובה, קרי האזור בו מתבצעת הדגימה, אלא גם ממשטר הזרימה. זאת בניגוד לשידור קרני גמה, עבורם ההשפעה היחידה על הנחתת השידור מתבצעת לאורך וכתוצאה מהתווך אותו הן עוברות. מסיבה זו תכנון גלאים אלו דורש כיוול נפרד עבור משטרי זרימה שונים וכן אבחון משטר הזרימה בעת המדידה. באופן כללי שימוש בגלאים אשר מורכבים לאורך היקף הצינור אינו מהווה הפרעה משמעותית לזרימה, קל מאוד להתקנם ומחירם אינו יקר. אך השימוש בהם דורש תכנון מתוחכם הן של הגלאים והן של המעגלים האלקטרוניים המחוברים אליהם. כמו כן, גלאים אלו רגישים מאוד לשינויים בתכונות החשמליות של הזורמים אשר מושפעות במידה ניכרת משינויי טמפרטורה וכן מעכירות הזורם. מידע מפורט המושג מניסויים בטמפרטורות שונות יכול לפתור רק חלק מהבעיה. דרך אלטרנטיבית הנה מדידת ייחוס נוספת ובו זמנית על מנת לפצות על השינויים באותות המתקבלים, דבר האפשרי רק בתנאי מעבדה.

יש לציין כי נסקרו רק חלק קטן מהשיטות למדידת מהירות והרכב הזרימה. השיטות שנסקרו הן אלו בהן משתמשים בזרימת Wet Gas.



### 2.3 שיטות מדידה עבור זרימת Wet Gas

עדיין לא קיימת הגדרה יחידה מקובלת למונח 'Wet Gas' מלבד לכך שמדובר בזרימת גז המכילה כמות מועטה של נוזל. בהסתמך על אפליקציה ספציפית, ישנם המגדירים את המונח 'Wet Gas' כזרימה בה השבר הנפחי של הגז, אחוז נפח הגז בזורם, מעל 95% ולפעמים מעל 90%, אחרים מגדירים זרימה כזו כזרימה עם שבר נוזל מסי הנמוך מ 70% או אף מ 50%.

עם זאת, ברוב המקרים המונח 'Wet Gas' מקושר לזרימה חד-פאזית גזית במקור בעלת מספר רכיבים בה חלק מהגז מתעבה לנוזל עקב שינויי לחץ וטמפרטורה דוגמת הולכת גז טבעי בצנרת בה חלק מהגז מתעבה לנוזל. זרימת Wet Gas נחשבת כענף נפרד בתחום הזרימה הרב פאזית וזאת משום שלא קיימת שיטת מדידה המסוגלת לכסות טווח מלא בזרימה המולטי פאזית. השיטות המתקדמות ביותר למדידת זרימת גז-נוזל מתפקדות בצורה טובה בטווח של שבר גז נפחי אשר נע בין 0% ל 90%.

מסיבות אלו, זרימות בהן שבר גז נפחי של למעלה מ 90%, החשובות עד מאוד בתעשיית הנפט עבור ניהול מאגרים וסחר דורשות פיתוח שיטת מדידה ומודלים עצמאיים.

רוב שיטות המדידה בזרימת Wet Gas עושות שימוש במכשור למדידת מפל לחץ. הנחת העבודה בזרימת Wet Gas היא כי הזרימה הנה הומוגנית, הנחה זו מאפשרת שימוש באפליקציות של משוואות המבוססות על זרימה חד פאזית דרך מכשירים למדידת הפרשי לחץ כאשר צפיפות הזורם מוחלפת בצפיפות תערובת הומוגנית אפקטיבית.

אך הנחת עבודה זו לא תמיד נכונה כיוון שכאשר שבר נפח הגז בתערובת הנו מעל 90% משטר הזרימה עלול להיות טבעתי (Annular) או שכבתי (Stratified) ולכן ישנן סטיות מהמודל ההומוגני המשמש לחיזוי מפל הלחץ בזרימה זו פאזית, במיוחד כאשר מדובר בלחצים נמוכים, זאת עקב ההבדלים הגדולים בין צפיפויות הפאזות וכתוצאה מכך האצת הגז דרך מכשיר המדידה מהירה בהרבה מהאצת הנוזל (Steven 2002).

מאחר ולא נמצא פתרון אנליטי לחישוב החלק היחסי של כל פאזה בזרימה פותחו קורלציות חצי אמפיריות אשר משפרות את ביצועי המכשור למדידת הפרש הלחצים. ניתן לחלק את הקורלציות הקיימות עבור חיזוי מפל הלחץ בזרימה זו פאזית לשתי קבוצות:

א. קורלציות המקשרות בין מפל הלחץ בזרימה זו פאזית למפל הלחץ בזרימה החד פאזית של כל זורם בנפרד.

ב. קורלציות המשתמשות בפרמטר אמפירי עבור ההפחתה בשטח החתך אותו תופס הגז עקב נוכחות הנוזל.

א. קורלציות המקשרות בין מפל הלחץ בזרימה דו פאזית לזרימה החד פאזית של כל זורם בנפרד קבוצת הקורלציות הראשונה מקשרת בין מפל הלחץ בזרימה דו פאזית דרך מכשור המדידה לבין מפל הלחץ דרך אותו מכשור מדידה במקרים בהם נוזל או גז יזרמו בנפרד. הקורלציה של Murdock (1962) הייתה הראשונה מסוג זה ופותחה בהנחת זרימה נפרדת בלתי דחיסה דרך נחיר אוריפיס בהעדר התחשבות בכוחות החיכוך/גזירה בין הנוזל לגז (נספח 1):

$$\left(\frac{\Delta P_{TP}}{\Delta P_G}\right)^{0.5} = C_M \left(\frac{\Delta P_L}{\Delta P_G}\right)^{0.5} + 1, \quad (3)$$

כאשר  $\Delta P_L$  ו  $\Delta P_G$  הם הפרשי הלחץ של הנוזל והגז בזרימה חד פאזית עקב ההצרה בקוטר הצינור במידה ורק נוזל או רק גז זורם דרך מכשיר המדידה,  $\Delta P_{TP}$  הוא הפרש הלחץ בזרימה דו פאזית, כאשר קבוע הקורלציה התיאורטי שווה לאחד,  $C_M = 1$ . על ידי אנליזה ממספר רב של נתונים אשר התקבלו מניסויים עבור זרימה דרך נחיר אוריפיס, נקבע ערך הקבוע האמפירי  $C_M = 1.26$ .

לקורלציה של Lin (1982) יש מבנה זהה למבנה הקורלציה של Murdock. מנייתוח מספר רב של נתונים מניסויים שונים עבור נחיר אוריפיס בטווח רחב של צפיפויות פאזות הגיע Lin למסקנה שהמקדם  $C_M$  תלוי ביחס צפיפויות הפאזות והציע עבורו את הקשר הבא:

$$C_M = \sum_{i=0}^5 C_i \left(\frac{\rho_G}{\rho_L}\right)^i, \quad (4)$$

כאשר המקדמים  $C_i$  נקבעים מניסויים.

Chisholm (1967) שיפר את הקורלציה של Murdock והוסיף למודל את כוחות הגזירה בין הזורמים (נספח 1):

$$\frac{\Delta P_{TP}}{\Delta P_G} = 1 + C_C \left(\frac{\Delta P_L}{\Delta P_G}\right)^{0.5} + \frac{\Delta P_L}{\Delta P_G}, \quad (5)$$

כאשר המקדם  $C_C$  הוא מקדם התלוי בכוחות הגזירה בין הפאזות -

$$C_C = \frac{1}{s} \left( \frac{\rho_L}{\rho_G} \right)^{0.5} + s \left( \frac{\rho_G}{\rho_L} \right)^{0.5}, \quad (6)$$

$$s = \frac{U_{GS}}{U_{LS}} : \text{ו- } s \text{ הנו היחס בין מהירויות הפאזות}$$

בהשוואת משוואה (5) לנתונים מניסויים, מצא Chisholm כי הערך  $C_C$  כמעט ואינו תלוי בצפיפויות הפאזות וקבוע עבור גיאומטריית צינור נחיר אוריפיס או צינור ונטורי ספציפיים בטווח רחב של פרמטרי זרימה.

לקורלציה של Chisholm יש יתרון על הקורלציה של Murdock וזאת כיוון שהיא תקפה גם עבור שני התנאים הקיצוניים בהם הזרימה היא חד פאזית, נוזל או גז. יש לציין כי ליתרון זה אין חשיבות רבה עבור זרימת Wet Gas, זאת כיוון שביישומים אלו לא נתקלים במצבים קיצוניים בהן הזרימה הנה חד פאזית נוזלית.

על ידי שימוש בקורלציה של Chisholm, de Leeuw (ראה Daniel et al. 2000) מצא כי הפרמטר  $C_C$  תלוי, בנוסף ליחס צפיפויות הפאזות, גם במספר Froude והציע את הקורלציה הבאה:

$$C_C = \left( \frac{\rho_L}{\rho_G} \right)^n + \left( \frac{\rho_G}{\rho_L} \right)^n, \quad (7)$$

כאשר

$$\begin{cases} n = 0.41, & 0.5 \leq F_{rg} \leq 1.5 \\ n = 0.606(1 - e^{-0.746F_{rg}}), & F_{rg} \geq 1.5 \end{cases} \quad (7a)$$

$$F_{rg} = U_{GS} \sqrt{\frac{1}{gD} \frac{\rho_G}{\rho_L - \rho_G}}.$$

ב. קורלציות המשתמשות בפרמטר אמפירי עבור ההפחתה בשטח החתך אותו תופס הגז עקב

נוכחות הנוזל

קבוצה נוספת של קורלציות לחישוב מהירות משתמשת בפרמטר אמפירי המוכפל במשוואה החד פאזית, פרמטר זה נגזר מההפחתה בשטח החתך אותו תופס הגז עקב נוכחות הנוזל. פרמטר זה נקרא The Blockage Factor (BF) (Wallis and Sullivan, 1972). פרמטר זה מיושם במשוואה הבאה:

$$Q_G = (BF) C \sqrt{\frac{\Delta P_{TP}}{\rho_G}}. \quad (8)$$

Smith & Leang (1975) הציעו קורלציה עבור BF במונחים של איכות הזרימה  $x$ , (השבר המסי של הגז):

$$BF = 0.637 + 0.4211x - 0.00183x^{-2} \quad (9)$$

$$x = \frac{W_G}{W_G + W_L}.$$

עבור  $x > 0.1$ , כאשר מעריכים את הקורלציה עבור נתונים מסדרת ניסויים, נמצא כי הקורלציה מתאימה הן עבור נחיר אוריפיס והן עבור ונטורי.

כל הקורלציות שהוזכרו הן בטווח סביר של דיוק כאשר משתמשים בהן עבור זרימת Wet Gas זאת בתנאי שיחס הנוזל בזורם או ספיקת הנוזל ידועים. את הפרמטרים הקשורים לזרימת הנוזל יש לקבוע, דבר זה מצריך מדידות נוספות.

פתרון עבור מדידת זרימת Wet Gas הוצע על ידי תאגיד אגר. השיטה המוצעת התבססה על הפרדת שתי הפאזות לקבלת פאזה גזית ופאזה נוזלית המכילה כמות קטנה של גז. המדידה בקו הזרימה הדו פאזי נערכה באמצעות PD meter ומד ספיקה ונטורי. מדידת הפאזה הגזית נערכה בקו זרימת גז נפרד.

פתרונות נוספים למדידת זרימת Wet Gas הוצעו על ידי חברת Multi Fluid Inc. הנורבגית וחברת Csiro האוסטרלית. הפתרונות מתבססים על הצלבת מידע משני גלאים המוצבים בשתי נקודות שונות במרחק קבוע בניהם. בשיטה זו משתמשים בשני צמדי גלאים זהים, בין אם גלאי אופייניים חשמליים ובין אם גלאי שידור וקליטת קרני גמה כפי שהחברות הנ"ל הציעו כך ניתן לנצלם גם לחישוב מהירות הזורם וגם לחישוב צפיפותו. אך בזרימת Wet Gas התנודות של האותות הנקלטים מאוד חלשות ולא מאפשרות הגדרה טובה של Cross correlation function

וזאת כנראה הסיבה העיקרית לכך ששני מדי זרימת Wet Gas העובדים בשיטה זו לא מסוגלים למדוד זרימות עם אחוז זרימת גז מעל 97-98%.

על מנת להזיל את עלות מכשור המדידה הציע Lund (1999) שיטת מדידה המשתמשת בשני מכשירים למדידת הפרש לחץ, מד ספיקה ונטורי ודיסקה מחוררת (Perforated Plate) המחוברים בטור. הדיסקה המחוררת מוצבת בצינור הזרימה וגורמת למפל לחץ במעבר הזורם דרכה. מפל הלחץ נמדד ובעזרתו ניתן לחשב את הספיקה. שילוב שני המכשירים הנ"ל יחדיו יוצר בעיה בדיוק המדידה משום ששני המכשירים מגיבים בצורה דומה לשינוי במהירות, כלומר הם מגיבים לשינוי מומנט הזרימה ולכן מייצרים קריאות תואמות אשר מפחיתות את דיוק המדידות. באמצעות שילוב של מדידים העובדים על פי עיקרון מדידה שונה ניתן לשפר את הביצועים.

שימוש במד ספיקה Vortex פרק (3) סעיף (3.3.5), הוכיח את עצמו הן כשיטה זולה והן כשיטה אמינה למדידת מהירות בזרימה חד פאזית ללא השפעת הצפיפות על ביצועי המכשיר. ניתן לצפות אם כן כי מד הספיקה Vortex יראה ביצועים משביעי רצון גם עבור זרימה דו פאזית. אולם יש לקחת בחשבון כי עקב הבדלי צפיפויות של הזורמים, הפאזות מופרדות במעבר דרך גוף ה Vortex דבר זה מגביר את תופעת האי הומוגניות בזרימה ומפריע בפרוש המדידות.

Hulin (1984) הראה כי בזרימת נוזל-גז ביחס שבר גז מסי מתחת ל 10% תדירות נשירה הערבולים מגוף ה Vortex קשורה למהירות פאזת הנוזל, כאשר יחס שבר הגז המסי גבוה יותר מ 10% הנשירה אינה סדירה.

Hussein & Owen (1991) מצאו כי עבור זרימת קיטור לח (Wet Steam) כאשר איכות הזרימה גדולה מ 84%,  $x > 0.84$ , מקדם התיקון עבור אות המוצא ממד הספיקה Vortex מתנהג בהתאם לשורש הריבועי של האיכות,  $\sim x^{1/2}$ .

מטרת מחקר זה הנה להעריך את ביצועי המערכת למדידת זרימת Wet Gas, המשלבת מד ספיקה ונטורי ומד ספיקה Vortex תחת תנאי זרימה שונים. על מנת להעריך את ביצועי המערכת השתמשנו בשתי סדרות נתונים:

1. נתונים אשר נלקחו ממערכת הניסוי אשר תוכננה ונבנתה במהלך עבודה זו, מערכת זו סיפקה נתונים מניסויים בלחצים נמוכים.
2. נתונים אשר נלקחו מזרימה בלחצים גבוהים, סדרה זו סופקה על ידי תאגיד אגר.

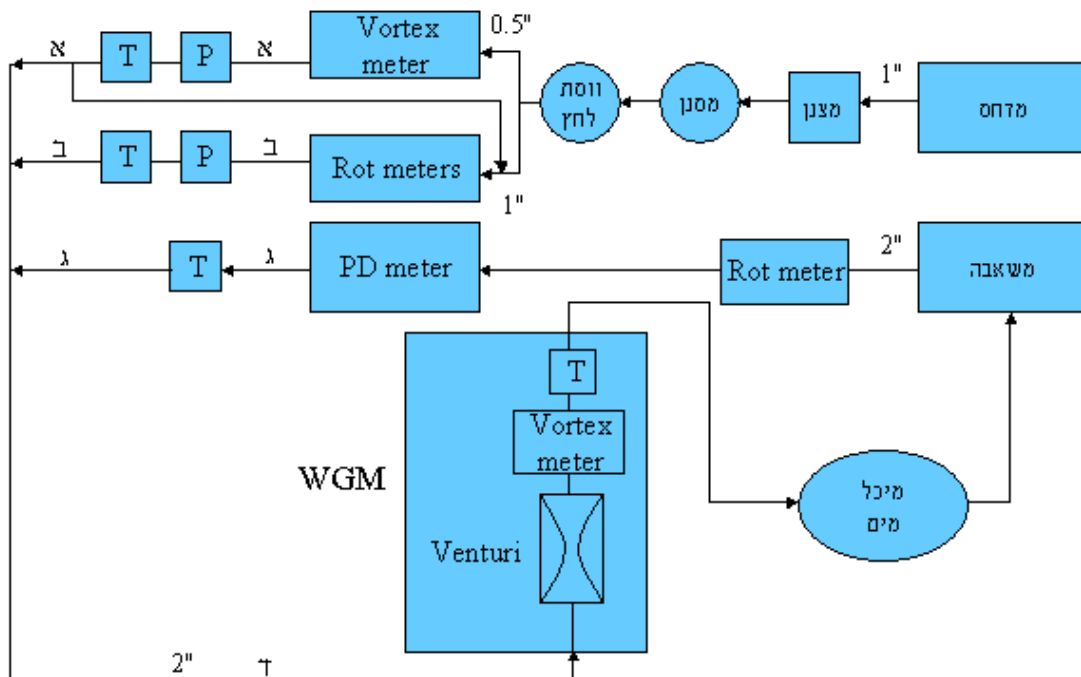
### 3 מערכת הניסוי ומכשירי המדידה

מערכת הניסוי (איורים 1 ו 2) מורכבת מקו זרימת נוזל וקו זרימת אוויר חד פאזיים המתחברים לקו זרימה דו פאזית. בקו הזרימה הדו פאזית ממוקמת מערכת למדידת זרימת Wet Gas הנקראת WGM (Wet Gas Meter) המורכבת ממד ספיקה ונטורי, וממד ספיקה Vortex.

לקווי זרימת האוויר מחובר מדחס בעל הספק של 11kW ובעל ספיקה מקסימלית של 44cfm ב 100psi. המדחס מזרים אוויר דרך מצנן המעבה מים על ידי קירור זרימת האוויר. לאחר המעבר במצנן, זורם האוויר דרך מסנן המנקז את המים ודרך וסת לחץ אל מערכת למדידת ספיקת גז המורכבת משני קווים המוצגים באיור 1:

קו א – קו זרימת אוויר בצנרת בעלת קוטר 0.5", אל קו זה מחובר מד ספיקה Vortex המודד את ספיקת האוויר, מד לחץ ומד טמפרטורה.

קו ב – קו זרימת אוויר בצנרת בעלת קוטר 1", אל קו זה מחובר רוטמטר המודד את ספיקת האוויר, מד לחץ ומד טמפרטורה.



איור 1: סקיצה של מערכת הניסוי.

אל קו זרימת הנוזל מחוברת משאבה צנטריפוגלית בעלת הספק של 11kW וספיקה מקסימלית של 130gpm בלחץ של 150psi. המשאבה הצנטריפוגלית שואבת מים ממכל ומזרימה את המים בקו זרימה חד פאזי כמוראה באיור 1:

קו ג – קו זרימת מים בצנרת בקוטר 2", אל קו זה מחוברים רוטמטר ו PD Meter המשמשים למדידת ספיקת המים. ביציאה מה PD meter מחובר מד טמפרטורה. בנקודת החיבור בין קווים ג ו ד הזרימה מקווי הזרימה החד פאזיים, אוויר ומים, מתאחדת לזרימה דו פאזית לצנרת בעלת קוטר 2". לאחר התייצבות הזרימה, הזרימה נכנסת למערכת המדידה WGM בקוטר 1". ה WGM מורכב ממד ספיקה ונטורי, מד ספיקה Vortex ומד טמפרטורה.

תשעה מדי לחץ מחוברים לקווי הזרימה השונים במערכת הניסוי. תשעת מדי הלחץ כוילו על פי צרכי עבודת המחקר על ידי מכשיר הנקרא Calibrator Beamex Pressure, מכשיר זה מכויל תקופתית על ידי היצרן.

במרחק של 10 קטרים ממד הספיקה ונטורי מורכב מד ספיקה Vortex המשמש למדידת תדירות הינתקות המערבולות ואחריו מחובר מד טמפרטורה.



איור 2 : מראה כללי של מערכת הניסוי.

### 3.1 בחירת מכשירי המדידה

#### 3.1.1 קווי זרימה חד פאזיים

תפקיד המכשירים אשר נבחרו עבור קווי זרימה אלו הנו לספק ספיקת ייחוס על מנת לכייל את מערכת המדידה והן לבדוק את איכות התוצאות המתקבלות מהמודל אשר נכתב עבור מערכת המדידה (פרק 6).

בבחירת מכשירי המדידה השונים הושם דגש על בחירת מכשירים בעלי דיוק גבוה.

#### זרימת נוזל (קו ג)

עבור מדידת הספיקה נבחר PD meter. שגיאת המכשיר היא  $\pm 2\%$  מקריאת המכשיר. קריאה מינימלית עבור מכשיר זה הנה  $75\text{ l/min}$  ולכן עבור ניסויים בספיקות נוזל נמוכות מערך זה הותקן רוטמטר בטור ל PD Meter בעל טווח עבודה של  $1.12 - 69\text{ l/min}$  ושגיאה של  $\pm 2.5\%$  מהקריאה. לאחר שהושלמו הניסויים עבור טווח עבודה זה, הרוטמטר הוחלף ברוטמטר לספיקות נמוכות עוד יותר, טווח עבודה  $0.14 - 2\text{ l/min}$  ושגיאת קריאה של  $\pm 2.5\%$ . בנוסף ובטור למכשירים אלו הותקן על קו זה מד טמפרטורה בעל שגיאת מכשיר  $0.3^\circ\text{C}$ .

הרוטמטר אשר שימש אותנו בניסויים בספיקות נוזל גדולות כויל על ידי כלי קיבול, מד משקל ושעון עצר ואילו הרוטמטר עבור הספיקות הנמוכות כויל על ידי מסורה ומד עצר.

#### מערכת מדידת ספיקת גז (קווים א ו ב)

המערכת למדידת ספיקת גז מורכבת משני קווי זרימה. בקו א מותקן מד ספיקה Vortex ואילו בקו ב רוטמטר. המערכת תוכננה כך שניתן יהיה לעבוד עם כל אחד מקווי הזרימה בנפרד או בטור. מד הספיקה רוטמטר משמש לעבודה בספיקות נמוכות ואילו מד הספיקה Vortex מכסה טווח עבודה רחב יותר ושימש אותנו עבור הספיקות הגבוהות.

קו א - זרימה אוויר בצנרת בקוטר  $1/2''$ . למדידת הספיקה נבחר מד ספיקה Vortex בעל שגיאה של  $\pm 0.8\%$  מערך הקריאה וטווח עבודה של  $6 - 76\text{ m/sec}$ , מד טמפרטורה ומד לחץ.

קו ב - זרימה אוויר בצנרת בקוטר  $1''$ . למדידת הספיקה נבחר רוטמטר בעל שגיאה של  $\pm 0.5\text{ SCFM}$  וטווח עבודה של  $0 - 33\text{ SCFM}$ , מד טמפרטורה ומד לחץ.

טווח העבודה של שני מדי הלחץ הנו  $0 - 600\text{ KPa}$ , שגיאת המכשירים  $\pm 1\%$  מערך הקריאה.



### 3.1.2 קו זרימה דו פאזית

מערכת מדידת הזרימה, WGM, כוללת מד ספיקה ונטורי, מד ספיקה Vortex ומד טמפרטורה המורכבים בטור. לפני מד הספיקה ונטורי מחובר מד לחץ אבסולוטי ושישה מדי לחץ דיפרנציאליים נוספים מחוברים בין נקודת הכניסה למד הספיקה ונטורי לבין שלוש נקודות חשובות על מד ספיקה זה, צוואר, הצרה ויציאה. כיוון שמפל הלחץ הדו פאזי גדול עד סדר גודל ממפל הלחץ עבור זרימת גז בלבד, בכל נקודת מדידה חיברנו שני מדי לחץ וזאת על מנת להתאים רזולוציה לגודל. כאשר האחד מכויל למדידת הפרשי לחצים גבוהים והאחר מכויל למדידת הפרשי לחצים נמוכים.

טווחי העבודה של מדי הלחץ מרוכזים בטבלה 1:

טבלה 1: טווחי עבודת מדי הלחץ המחוברים בנקודות שונות במערכת המדידה.

מדידת הלחץ בכניסה	מדידת הפרש הלחץ בין נקודת הכניסה לבין ה-			לחץ
	יציאה	הצרה	צוואר	
[KPa]	[KPa]			
	-12.5-174.5	-12.5-49.5	-12.5-174.5	גבוה
	0-5	0-5	0-15	נמוך
128-1135				אבסולוטי

שגיאת כל מדי הלחץ הנה  $\pm 0.1\%$  מערך הקריאה.

### 3.2 קריאות ייחוס אוויר/מים

בהנחה כי האוויר מתנהג כגז אידיאלי, ספיקת האוויר ב WGM חושבה על ידי המשוואה הבאה:

$$Q_{WGM} = Q_a \frac{P_a}{P_{WGM}} \frac{T_{WGM}}{T_a}, \quad (10)$$

כאשר  $P_a, T_a, Q_a$  הם הספיקה, הטמפרטורה והלחץ של האוויר במערכת מדידת הגז החד פאזית בהתאמה ואילו  $P_{WGM}, T_{WGM}, Q_{WGM}$  הם הספיקה, הטמפרטורה והלחץ של האוויר במערכת המדידה הדו פאזית בהתאמה. במידה וספיקת האוויר דרך מערכת מדידת הגז נמדדת על ידי רוטמטר,  $Q_a$  מתקבל מהמשוואה הבאה (ראה נספח 2):

$$Q_a = Q_s \sqrt{\frac{P_s T_a}{P_a T_s}}, \quad (11)$$

כאשר האינדקס s מייצג תנאים סטנדרטיים בהם כויל הרוטמטר ואילו האינדקס a את התנאים בעת המדידה.

בהנחה כי המים הנם נוזל בלתי דחיס, הספיקה הנפחית דרך מערכת המדידה זהה לספיקה הנפחית הנמדדת בקו זרימת הנוזל.

### 3.3 מכשירי המדידה

#### 3.3.1 מד ספיקה PD Meter

נעשה שימוש במד ספיקה מסוג Oval gear של חברת Brooks. מד הספיקה משמש למדידת ספיקת הנוזל. מודד את שטף הזרימה על ידי חלוקה רציפה של הזורם לקטעי נפח ידועים וזאת על ידי רוטור מיוחד המעוצב למטרה זו. השטף הנפחי הכולל פרופורציונלי למהירות הסיבוב של הלהבים המוקנת להם על ידי הזורם.



איור 3 : מד ספיקה Positive displacement.

#### 3.3.2 מדי לחץ

נעשה שימוש במדי לחץ מסדרת Rosemount דגם 3051 pressure transducers. שתי נקודות מדידה שונות מחוברות לתא, התא מבודד על ידי שתי ממברנות מבודדות התוחמות אותו (יוצרות בידוד מהסביבה ומונעות קורוזיה). ממברנות אלו מרגישות את הלחץ באופן ישיר ומחוברות על ידי מוטות קרמיים לשני משטחים מתכתיים קבועים הממוקמים בתוך התא. משטחים אלו נמצאים משני הצדדים של ממברנה פנימית. ממברנה פנימית זו הנה צלחת קיבול המוקפת בנוזל מילוי (סיליקון). ממברנה זו נוטה לאחד הצדדים בהתאם להפרש הלחצים משני הצדדים של התא. הלחץ מועבר אל הממברנה דרך נוזל המילוי. ההטיה של הממברנה ביחס לשני המשטחים הקבועים יוצרת שינוי בקיבול בין הממברנה ושני משטחים אלו, מעגל אלקטרוני מודד את השינויים בקיבול ובהתאם אליהם מחולל אות של  $4-20mA$ , המכשיר מכויל מראש לטווח עבודה רצוי, אות היציאה ממנו פרופורציונלי באופן ישיר להפרש הלחצים.



איור 4 : מד לחץ.

### 3.3.3 מדי טמפרטורה

נעשה שימוש במדי טמפרטורה מסדרת Rosemount דגם RTD PT 385 type temperature transmitters. מדידת הטמפרטורה נעשית על ידי חוט פלטינה, חוט הפלטינה הנו בעל התנגדות של  $100\Omega$  בטמפרטורה של  $0^{\circ}\text{C}$ , התנגדות החוט משתנה באופן ישיר ובצורה ליניארית עם השינוי בטמפרטורה. על ידי מדידת התנגדות החוט ניתן לקבל את טמפרטורה הזורם.



איור 5 : מד טמפרטורה.

### 3.3.4 מד ספיקה רוטמטר

מדידת הספיקה נעשית בעזרת מצוף המשנה את גובהו כתלות בשינוי הספיקה. הצינור בו נע המצוף הוא בעל קוטר משתנה הגדל עם הגובה. המצוף עולה ונעצר בנקודה בה ישנו איזון בין כוחות הכבידה, כוחות הציפה וכוחות הגזירה. כאשר הצפיפות קבועה יש קשר בין שיעור הזרימה לשטח המדיד באזור הקריאה. הקשר בין מיקום המצוף לבין שיעור הזרימה מתבסס על כיוול המכשיר, כאשר הצפיפות של הזורם ששימש בעת הכיוול זהה לצפיפות של הזורם אותו מודדים, המדידה תהיה מיידית. הצינור מתוכנן כך שקיים קשר בין גובה המצוף לספיקת הזורם. כאשר לזורם הנמדד צפיפות השונה מזו שעבורה כוילה המערכת, יש לקחת שינוי זה בחשבון (נספח 2).



איור 6 : מד ספיקה רוטמטר.

### 3.3.5 מד ספיקה Vortex

נעשה שימוש במדי ספיקה מתוצרת Rosemount דגם 8800 series. מדידת הספיקה נעשית על ידי הפרעה לזרימה, הנגרמת על ידי החדרת גוף (Bluff Body) לתוך הזרימה. אל הגוף המפריע לזרימה מחובר גביש פייזואלקטרי. על גבי הגוף המפריע נוצרות מערבולות. הגוף בנוי בצורה כזו שהמערבולות הנוצרות תהיינה 'חזקות' ככל הניתן. התנתקות המערבולות גורמת לתנודות בלחץ בחלקו האחורי של הגוף ועל ידי כך ליצירת מאמץ רגעי בצדו של גוף זה המחובר לגביש פייזואלקטרי. מאמץ זה גורם להפרדת מטענים על גבי הגביש ולקבלת פולס חשמלי, תדירות התנתקות המערבולות ומכאן תדירות הפולסים החשמליים פרופורציונלית באופן ישיר למהירות הזורם.

לכל מד ספיקה Vortex מקדם  $C_{VM}$  (K Factor) משלו כמוראה במשוואה (12). מקדם זה תלוי בגיאומטריית המכשיר ונקבע עבור כל מכשיר על ידי בחינת הקשר בין מהירות הזורם לבין התדירות בזרימה חד פאזית. המקדם  $C_{VM}$  מבוטא בפולסים לגלון (pulses/gallon) וניתן להמרה ליחידות הנדסיות אחרות. אות המוצא נתון לבחירה 4–20mA או תדירות הפולסים ומתורגם לספיקה. עבור זרימה חד פאזית הספיקה מתקבלת על ידי המשוואה הבאה:

$$Q = C_{VM} \cdot f, \quad (12)$$

כאשר  $f$  הנה תדירות נשירת המערבולות מגוף ה Vortex.



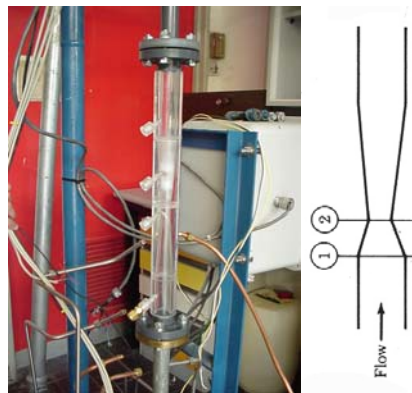
איור 7: מד ספיקה Vortex.

### 3.3.6 מד ספיקה ונטורי

מד ספיקה ונטורי הנו צינור אשר שטח החתך שלו משתנה בצורה מתונה, שינוי שטח החתך גורם לירידת לחץ בין נקודות 1 ו 2 (איור 8). את הפרש הלחצים מודדים בין שני שטחי החתך על ידי מד לחץ דיפרנציאלי. בזרימה חד פאזית הפרש הלחץ מהווה אינדיקציה לגבי הספיקה הנפחית. עבור זרימה חד פאזית ניתן לקבל את ערך הספיקה על ידי שילוב בין משוואת שימור האנרגיה למשוואת הרציפות והכפלה במקדם הפריקה,  $C$ . מקדם הפריקה הנו עבור מכשיר ספיקה ונע בתחום של 0.96 – 0.98 עבור מד ספיקה ונטורי סטנדרטי:

$$Q = CA_2u_2 = CA_2 \sqrt{\frac{1}{1 - \left(\frac{A_2}{A_1}\right)^2} \frac{2\Delta P}{\rho}}, \quad (13)$$

כאשר  $A_1$  ו  $A_2$  הנם שטחי חתך הכניסה וההצרה של מד הספיקה ונטורי בהתאמה,  $u_2$  מהירות הזרם ו  $\rho$  צפיפות הזרם.

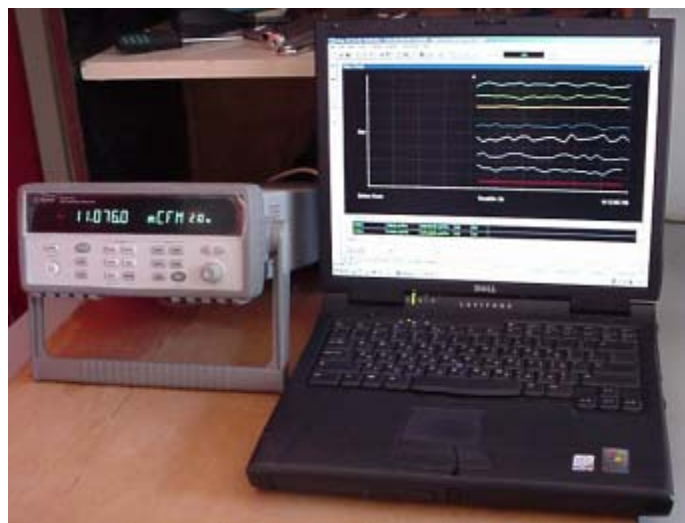


איור 8 : מד ספיקה Venturi.

### 3.3.7 מערכת איסוף המידע

איסוף המידע נעשה על ידי Agilent data logger, אשר חובר למחשב. ה Data logger בנוי משני כרטיסי דגימה, המכילים יחד 38 ערוצים. במהלך הניסויים נדגמו 16 ערוצים שונים, בקבוצות של 100 דגימות בתדירות 1Hz.

הנתונים נשמרו על גבי מחשב מתוצרת חברת Dell דגם Latitude, למחשב מעבד פנטיום 4 בעל מהירות שעון של 1.8GHz וזיכרון של 256RAM. הנתונים נאספו בעזרת תוכנה הנקראת Agilent benchlink data logger.



איור 9 : מערכת איסוף המידע.

## 4 מהלך הניסויים

בוצעה סידרה של ניסויים דו פאזיים על מנת לקבוע את החומר בו תמולא הצנרת המחוברת בין מדי הלחץ לנקודות המדידה. סוגיה זו לא קיימת במדידת זרימה חד פאזית אך במהלך זרימה דו פאזית עלולה לגרום לטעויות רבות בניתוח המדידות. זאת במידה והצנרת מולאה במים, המים מהצנרת עלולים להישאב לתוך הזרימה ולהפך מים יכולים להיכנס מהזרימה אל תוך הצנרת במידה ולא מולאה במים.

על מנת לקבוע את הקונפיגורציה הטובה ביותר נעשו מספר ניסויים עם אוויר בצנרת ומספר ניסויים עם מים בצנרת אשר מטרתם הייתה להחליט האם יש למלא את הצנרת במים או בחומר יותר צמיג, דוגמת סיליקון. בניסויים בהם היה אוויר בצנרת הפרש הלחצים בין נקודות המדידה השתנה בסוף הניסויים ומכאן הסקנו כי מים הצטברו בצנרת. כאשר בדקנו ניסויים בהם היו מים בצנרת הפרש הלחצים היה זהה לפני ואחרי הניסוי ושווה ל  $\Delta P = \rho_{H_2O}gh$  אי לכך הוחלט על מילוי הצנרת במים.

לאחר מכן התבצע איפוס קריאות מדי הלחץ, האיפוס התבצע על ידי דגימת נתונים כאשר אין כלל זרימה במערכת הניסוי. נתונים ממדי הלחץ השונים נבדקו כאשר צנרת המדידה מלאה במים. הלחץ האבסולוטי הנבדק כויל ללחץ האטמוספרי והפרשי הלחצים בין נקודות המדידה השונות המחוברות למד הספיקה ונטורי אשר מוצב בצורה אנכית במערכת המדידה, איור (8) פרק (2), אמורים להורות על הפרש לחץ הזהה לעמוד המים בגובה האקוויוולנטי להפרש הגבהים בין נקודות המדידה כפי שאכן הראו התוצאות מהן הסקנו כי המערכת מאופסת.

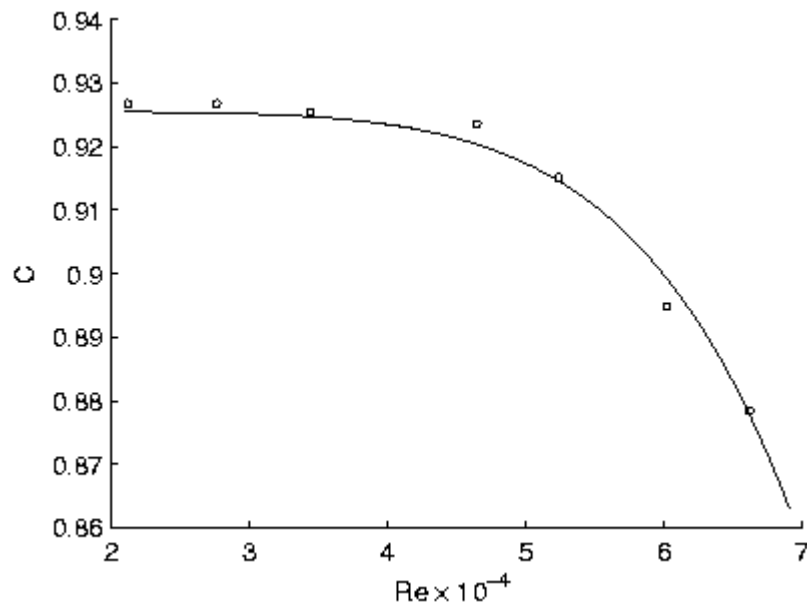
### 4.1 כיול מד הספיקה ונטורי

רוב הקורלציות לחיזוי מפל לחץ בזרימה דו פאזית דורשות ידע של התנהגות מכשיר המדידה במהלך זרימה חד פאזית. לכן, ראשית בוצעה סידרה של ניסויים חד פאזיים של גז וזאת על מנת לכייל את מד הספיקה ונטורי, כיול זה נעשה על ידי הצגת ערכי מקדם הפריקה C (הגדרה של C ניתן לקבל ממשואה (13) פרק 3) כנגד מספר ריינולדס,  $Re = \rho uD/\mu$ . בניית גרפי הכיול נעשתה עבור טווח ספיקות הניתן להשגה על ידי מדחס האוויר. ערך הזרימה המינימלי הוגבל על ידי טווח העבודה של מד הספיקה ונטורי ( $Re = 10^4$ ).



במערכת הניסוי אשר נבנתה לצורך עבודת מחקר זו, קיימות ארבע נקודות למדידת הפרשי לחץ בזרימה דרך מד הספיקה ונטורי כפי שניתן לראות בנספח 3. בדיקת התנהגות מקדמי הפריקה עבור כל נקודת מדידה הראתה כי רק עבור  $\Delta P_2$  (נקודת המדידה בין חתך הכניסה לחתך הצוואר של מד הספיקה ונטורי) התקבלו נתונים עקביים, אי לכך עבור נקודת מדידה זו התבצעו כלל החישובים.

כדי לתאר את תלות מקדם הפריקה במספר Re ביצענו התאמה של העקומה  $C = C_\infty + C_{Re} Re^n$  לנתונים הניסויים.



איור 10 : מקדם הפריקה כתלות במספר ריינולדס.

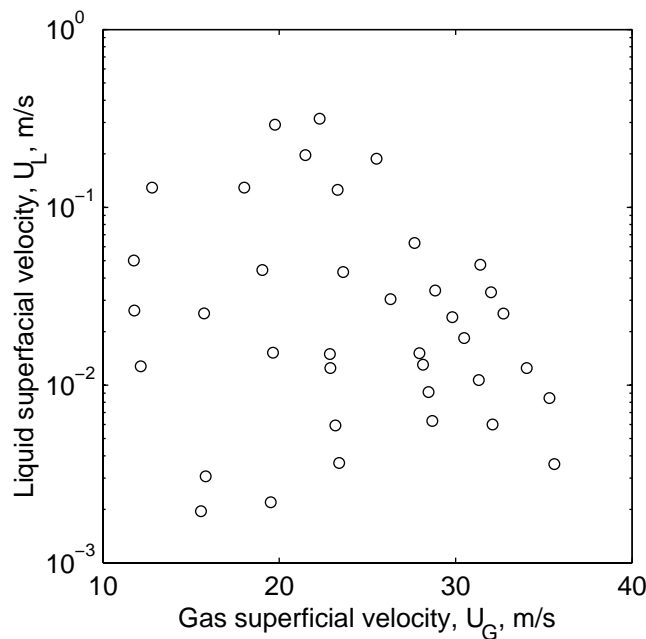
כאשר המקדמים של העקומה נמצאו לפי שיטת הריבועים המינימליים (הפחותים):  
 $n = 6.31, C_{Re} = -1.9 \cdot 10^{-32}, C_\infty = 0.926$  (איור 10). יש לציין כי העקומה שהתקבלה אינה עקומה סטנדרטית, הסיבה לכך יכולה לנבוע מבעיות הנובעות מהתקנת מד הספיקה ונטורי. מד הספיקה ונטורי מוקם פחות מעשרה קטרים לאחר הצרת קוטר הצנרת במערכת המדידה (מ"מ 2 ל"מ 1) משום שמד הספיקה ונטורי ומד הספיקה Vortex המחוברים בטור במערכת המדידה ניתנים להסרה והחלפה מאזור מוגדר וקבוע אשר לא אפשר להתגבר על מגבלות המקום בהתקנה.

## 4.2 ניסויים דו פאזיים בלחץ נמוך

בהתחלת כל סדרת ניסויים נדגמו הנתונים כאשר אין כלל זרימה במערכת וזאת על מנת לבדוק את הקריאות מכל המכשירים ובמיוחד ממדי הלחץ (מוודאים שמים לא נשאבו החוצה מהצנרת המתברת בין מדי הלחץ לבין מד הספיקה ונטורי). לאחר מכן נקבעה ספיקת האוויר הרצויה ובוצעה דגימת נתונים בזרימה חד פאזית דרך מערכת המדידה. עבור כל ספיקת אוויר נקבעה ספיקת מים ולאחר התייצבות הזרימה הדו פאזית (עקב אופייה של הזרימה קרי משטרי הזרימה השונים, בכל פעם שנקבעו ספיקות אוויר/נוזל חדשות היה צורך להמתין כחמש דקות עד להתייצבות הזרימה הדו פאזית) נדגמו הנתונים וכך חוזר חלילה, לאחר מכן שונתה ספיקת האוויר והתהליך חזר על עצמו. בסוף התהליך בוצעה דגימה נוספת כאשר אין כלל ספיקה במערכת הניסוי וזאת על מנת לוודא שתוצאות דגימות אלו זהות לדגימות אשר בוצעו בתחילת הניסוי ואכן התקבלו תוצאות זהות.

בקו הזרימה החד פאזי נוזל נדגמו ספיקת וטמפרטורת הנוזל. במערכת המדידה החד פאזית גז נדגמו הטמפרטורה, הלחץ וספיקת הגז. במערכת המדידה הדו פאזית, WGM, נדגמו הלחץ בכניסה למערכת, הפרשי הלחץ בין נקודות הדגימה המחוברות למד הספיקה ונטורי, ספיקת הזורם על ידי מד הספיקה Vortex וביציאה ממנו נמדדה טמפרטורת הזורם. כל הנתונים נדגמו בתדירות 1Hz במשך 100 שניות.

איור (11) מתאר את טווח הניסויים עבור זרימה דו פאזית אוויר-מים שנערכו בלחצים נמוכים במערכת הניסוי אשר נבנתה לצרכי מחקר זה (פרק 3). הניסויים נערכו בלחץ של 0.15MPa, טווח ספיקת גז נפחית  $6 \cdot 10^{-3} \div 20 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$  וטווח ספיקת נוזל נפחית  $0 \div 0.018 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ . עבור נתוני זרימה אלו, טווח הספיקה המסי של התערובת  $0.01 \div 0.2 \text{ kg/s}$  ואיכות הזרימה  $0.1 < x < 1$ .



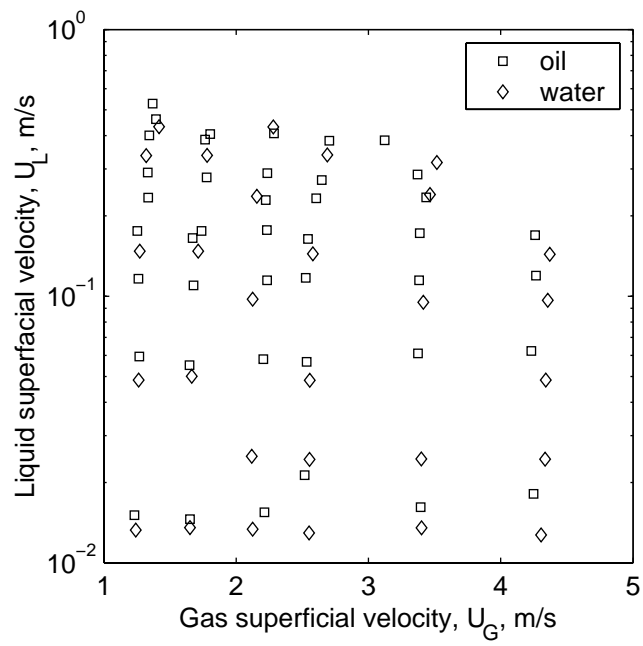
איור 11: טווח הניסויים לחצים נמוכים.

### 4.3 נתונים עבור זרימת Wet Gas בלחץ גבוה

הנתונים מהניסויים אשר נערכו בלחצים גבוהים התקבלו מתאגיד אגר. ניסויים אלו נערכו בלחץ של 7MPa בזרימה תלת פאזית הכוללת גז טבעי בעל משקל מולקולרי של 18.4. פאזה נוזלית הכוללת מים ודיזל בעל צפיפות של  $880 \text{ kg/m}^3$ , צמיגות של 2cP ב  $40^\circ \text{C}$ . קוטר מערכת הניסוי הנו 4". טווח ספיקת הגז הנפחית  $9 \cdot 10^{-3} \div 28 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$  וטווח ספיקת הנוזל הנפחית  $0 \div 3.5 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$  התואמים לטווח ספיקה מסית כללית של התערובת  $0.5 \div 3.8 \text{ kg/s}$  בתנאי הזרימה הספציפיים כאשר איכות הזורם, x, נעה בין 0.15 ל 1 (ראה איור 12).

הפרשי הלחץ נמדדו במעבר דרך מד הספיקה ונטורי בין הצוואר לכניסה (יחס צוואר כניסה שווה ל 0.552) על ידי מדי לחץ מתוצרת Rosemount 3051 series. מהירות הזורם נמדדה על ידי מד ספיקה Vortex בקוטר 4", מתוצרת Rosemount 8800 series בעל טווח עבודה של  $2 \div 47 \text{ m/s}$ . בכניסה למערכת המדידה נמדדו לחץ אבסולוטי וטמפרטורת הזורם כאשר בקווי הזרימה החד פאזיים נמדדו ספיקות הגז והנוזל.

כיוון שבלחץ גבוה הגז הטבעי אינו מתנהג כגז אידיאלי, קורלציות עבור מקדם הדחיסות והצמיגות עבור הגז הטבעי אומצו מ (Danesh 1998).



איור 12: טווח הניסויים לחצים גבוהים.

## 5 ניתוח הנתונים

לפני הערכת הביצועים של שילוב המכשירים, מד ספיקה Vortex ומד ספיקה ונטורי למדידת זרימת Wet Gas, נבדקו הביצועים של כל מכשיר בנפרד, בזרימה דו פאזית כפי שמתואר בסעיפים הבאים.

### 5.1 מד ספיקה Vortex

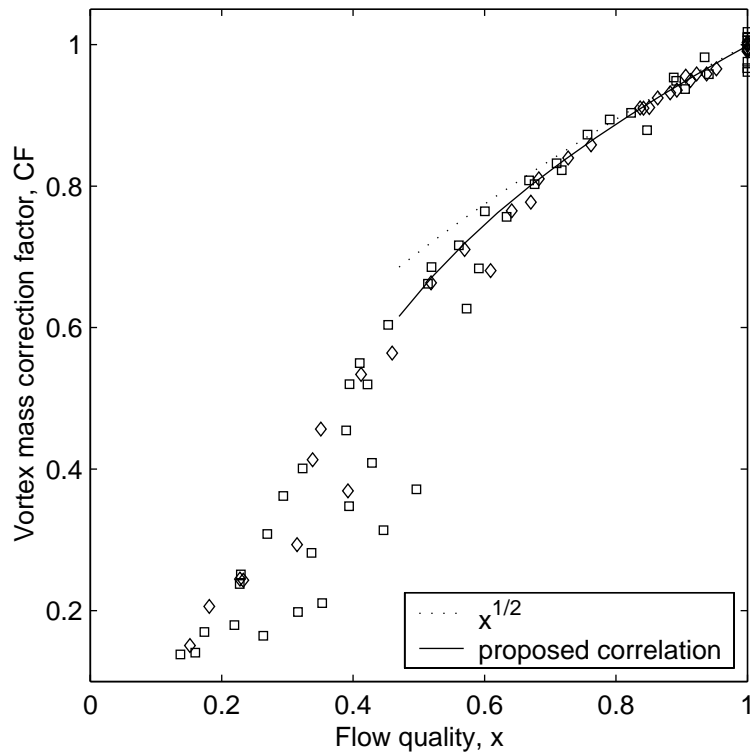
איורים (13) ו (14) מתארים תלות של מקדם התיקון הדו פאזי,  $CF$  (Correction factor), באיכות הזורם,  $x$ . מקדם התיקון הוגדר כ  $CF = W_v/W$ , כאשר  $W_v$  היא הספיקה המסית המתקבלת על ידי מכשיר המדידה בהנחה כי רק גז זורם דרכו,  $W$  היא ספיקת התערובת האמיתית. כאשר בוחנים את מקדם התיקון עבור ניסויים בלחצים גבוהים (איור 13), בהם איכות הזרימה גדולה מ 50% ( $x > 0.5$ ), ניתן לראות כי בדומה למחקרם של Hussien and Owen (1991) מקדם התיקון מתנהג על פי שורש איכות הזרימה,  $CF = x^{1/2}$ , זאת אף על פי שבאיכויות זרימה הקטנות מ 80% חלה סטייה ממשוואה זו. יש לציין כי במחקרם, Hussien and Owen אבחנו את מקדם התיקון הנייל עבור סדרות ניסויים בהן איכות הזרימה הייתה גדולה מ 84%. עוד ניתן לראות מאיור (13) כי כאשר איכות הזרימה קטנה מ 50% אין משוואה אחת היכולה לתאר את מקדם התיקון, דבר זה מתקשר לעובדה שבשברי ספיקה שכאלה ( $x < 0.5$ ) תדירות נשירת הערבולים מגוף ה Vortex אינה סדירה וחסרת משמעות. כאשר משתמשים בשיטת הריבועים הפחותים לקבלת הקשר בין מקדם התיקון,  $CF$ , לאיכות הזורם,  $x$ , עבור תוצאות ניסויים בהן  $0.5 < x < 1$  מקבלים את המשוואה הבאה עבור מקדם התיקון:

$$\begin{aligned} CF &= x^{1/2} f(x) \\ f(x) &= 1 - ae^{-bx} \end{aligned} \quad (14)$$

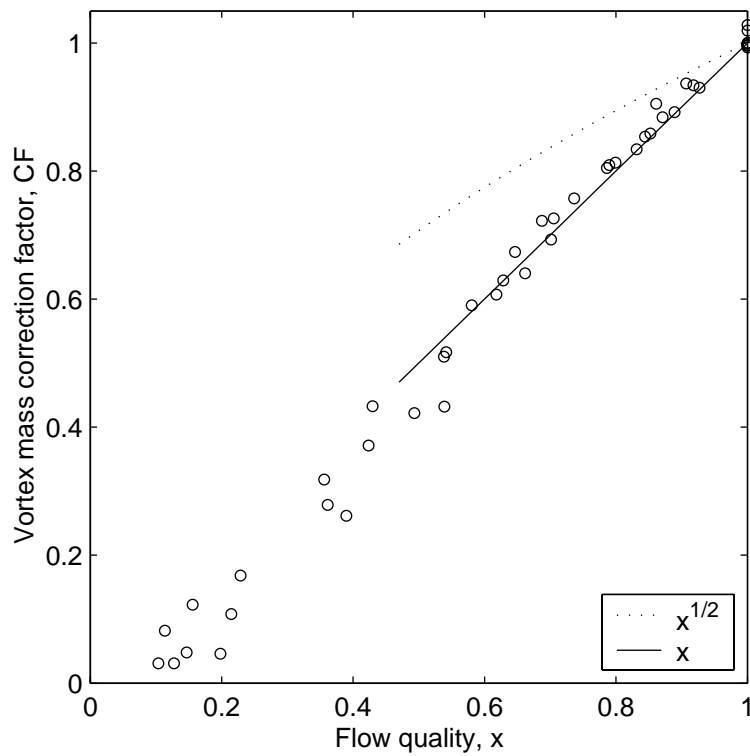
כאשר  $a=3.9$  ו  $b=7.8$ . מקדם תיקון זה מאפשר דיוק של עד 2.6% עבור אות היציאה ממד הספיקה Vortex.

כאשר מסתכלים על התנהגות מד הספיקה Vortex בזרימה בלחצים נמוכים (איור 14), ניתן לראות התנהגות דומה איכותית. גם במקרה זה עבור  $x < 0.5$ , אות היציאה של המכשיר אינו סדיר

וחסר משמעות וכתוצאה מכך לא ניתן לתאר את מקדם התיקון בטווח זה על ידי משוואה אחת. עבור שבר מסי גבוה של גז מקדם התיקון ניתן לתיאור אך סוטה מהערך  $x^{1/2}$  ומתואר על ידי הקו הישר  $CF = x$ , כלומר אות היציאה מהמכשיר שווה לספיקת הגז  $Q_V = Q_G$ , מכך ניתן להבין כי בניסויים שנערכו בלחצים נמוכים מד הספיקה Vortex אינו רגיש להופעת הנוזל בזרימה. חשוב לציין כי ביצועי מד הספיקה Vortex תלויים (אפילו בזרימה חד פאזית) באלקטרוניקה הפנימית של המכשיר ובטכניקת עיבוד אות המוצא הגולמי (Raw signal). אולי מכך ניתן להסיק כי בלחצים גבוהים במעט (4; 6 atm), Hussien and Owen, אבחנו תוצאות שונות מאלו שאובחנו מסדרות הניסויים שנערכו במסגרת מחקר זה. על פי התוצאות שהתקבלו מניסויים בלחצים נמוכים בזרימה דו פאזית דרך מד הספיקה Vortex אנו מציעים כי יש לבחון גם את אות המוצא הגולמי של מד הספיקה. עם זאת בסדרת הניסויים שנערכו בלחצים גבוהים התוצאות עבור ניסויים בהם  $x > 0.8$  מחזקות את אבחונם של Hussien and Owen וכי בשברי גז מסיים כאלה ניתן להתייחס אל מקדם התיקון  $CF = x^{1/2}$  כאוניברסלי.



איור 13: מקדם התיקון CF עבור זרימה בלחץ גבוה דרך מד הספיקה Vortex. מקרא – ראה איור 12.



איור 14: מקדם התיקון CF עבור זרימה בלחץ נמוך דרך מד הספיקה Vortex.

## 5.2 מד ספיקה ונטורי

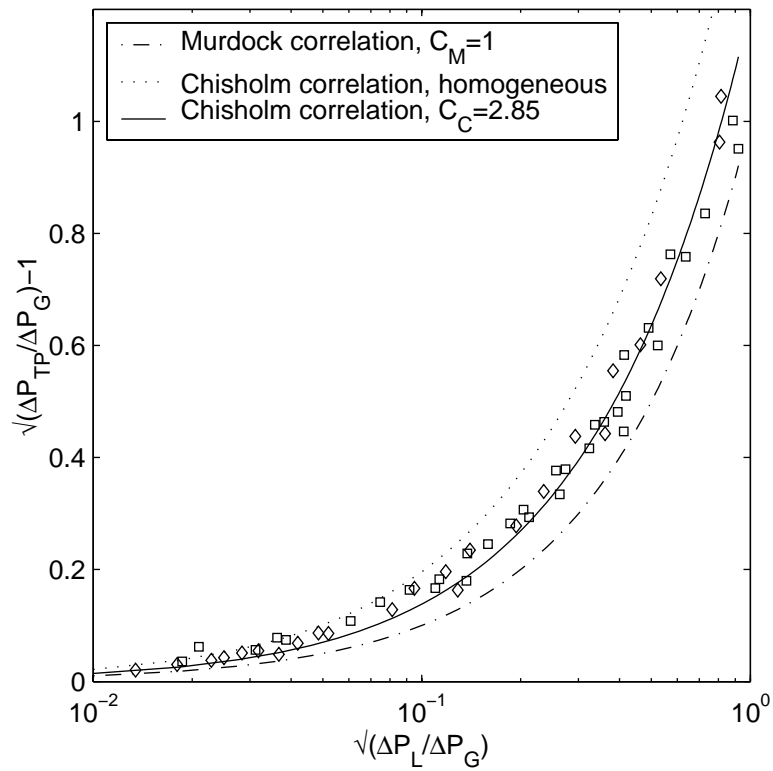
הערכנו שתי קורלציות קיימות המתארות מפל לחץ דרך מד הספיקה ונטורי – הקורלציות של Murdock ושל Chisholm. מאחר והן הקורלציה של Murdock והן הקורלציה של Chisholm פותחו עבור זרימה אופקית היה צורך להתאימם לזרימה אנכית בה מורכב הונטורי, פרק (3) איור (8), זאת על ידי התחשבות בהפרש הגבהים בין נקודות המדידה. מסיבה זו הוחסר הפרש הלחץ הנובע מעומד הנוזל מהפרש הלחץ אשר מופיע בנוסחאות (3) ו (5):

$$\Delta P_{TP} \rightarrow \Delta P_{TP} - \rho_H gh \quad (15)$$

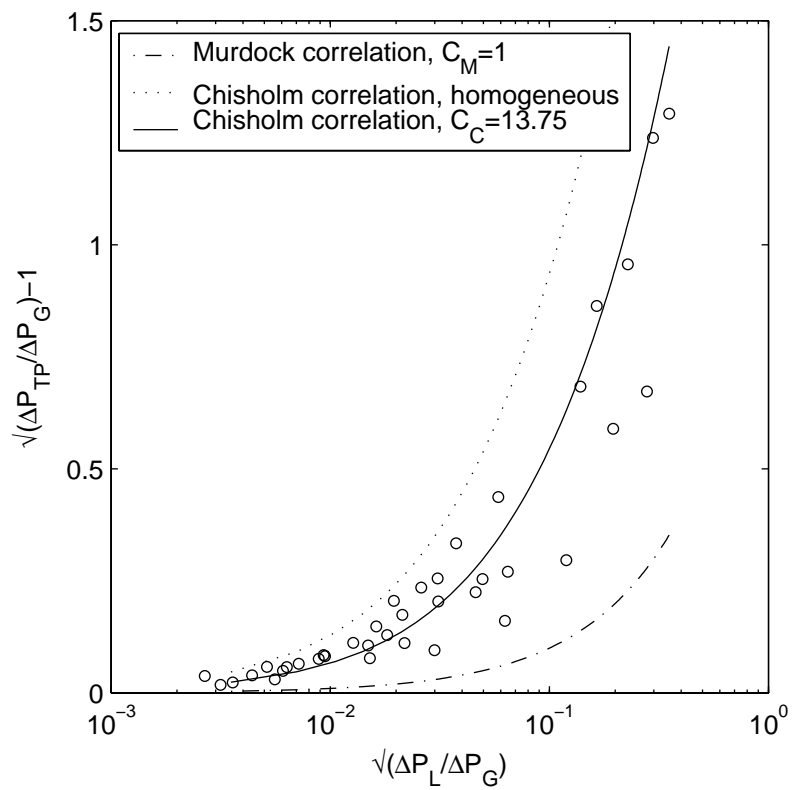
וכך ניתן היה להמשיך ולהעריך את  $\Delta P_G$  ו  $\Delta P_L$  כאילו הזרימה אופקית. במשוואה (15)  $\rho_H$  היא הצפיפות הממוצעת של הזורם,  $\rho_H = (x/\rho_G + 1 - x/\rho_L)^{-1}$ , אשר חושבה בהנחת זרימה הומוגנית.

מקדם המודל התקבל על ידי הצגת גרף של קבוצת הפרמטרים  $\sqrt{(\Delta P_{TP} - \rho_H gh)/\Delta P_G} - 1$  כנגד קבוצת הפרמטרים הבאה  $\sqrt{\Delta P_G/\Delta P_L}$  כאשר הפרש הלחץ הדו פאזי,  $\Delta P_{TP}$ , נמדד ב WGM ואילו הפרשי הלחץ החד פאזיים,  $\Delta P_G$  ו  $\Delta P_L$ , חושבו מהספיקות החד פאזיות הידועות (על ידי משוואה 13) וזאת בהנחת זרימה חד פאזית דרך מערכת המדידה. העברת קו המגמה בין הערכים בוצעה באמצעות שיטת הריבועים הפחותים. באיורים (15) ו (16) מוצגות התוצאות המבוססות על סדרות הניסויים בלחץ גבוה ונמוך בהתאמה. נעשתה השוואה בין הקורלציה של Murdock (פרק 2 משוואה 3) בתנאים אידיאליים ללא חיכוך,  $C_M = 1$ , לבין הקורלציה של Chisholm (פרק 2) משוואה 5) עבור תנאים הומוגניים בהם יחס מהירויות  $s = 1$ .





איור 15 : קביעת מקדם המודל עבור זרימה בלחץ גבוה דרך מד הספיקה ונטורי .  
מקרא – ראה איור 12.



איור 16 : קביעת מקדם המודל עבור זרימה בלחץ נמוך דרך מד הספיקה ונטורי .

על ידי הערכת המשוואות בעזרת שיטת הריבועים הפחותים עבור סדרת הניסויים שנערכו בלחץ נמוך דרך מד הספיקה ונטורי 1" נתקבלה ההתאמה הטובה ביותר בין תוצאות המדידה מהקורלציה של Chisholm כאשר  $C_c = 13.75$ , כאשר השגיאה שהתקבלה בין ערך הפרש הלחץ המחושב,  $\Delta P_{TP}^P$ , לבין הפרש הלחץ הנמדד,  $\Delta P_{TP}^m$ , עבור כל טווח הניסויים מגיעה עד ל 10.6% ואילו עבור ניסויים שנערכו באיכות זרימה של  $x > 0.5$  השגיאה מגיעה עד ל 4.4%. עבור הניסויים שנערכו בלחץ גבוה דרך מד ספיקה ונטורי 4" התקבלו בהתאמה הערכים הבאים:  $C_c = 2.85$ , 4.5%, 2.5%.

## 6 חישוב הספיקות

חישוב הספיקות הנפחיות של הגז והנוזל נעשה על ידי קריאות מד הספיקה ונטורי,  $\Delta P_{TP}^m$ , ומד הספיקה Vortex,  $Q_V^m$ , זאת על ידי מערכת המשוואות עבור שני הנעלמים,  $Q_L$  ו  $Q_G$ , המתארת את תגובות מכשירים אלו בזרימת Wet Gas:

$$\begin{cases} \frac{\Delta P_{TP}^m - \rho g h}{\Delta P_G} = 1 + C_c \left( \frac{\Delta P_L}{\Delta P_G} \right)^{0.5} + \frac{\Delta P_L}{\Delta P_G} \\ Q_V^m = \frac{W_x^{1/2} (1 - a e^{-bx})}{\rho_G} \end{cases} \quad (16)$$

מערכת המשוואות אינה ליניארית, לכן פתרון מערכת המשוואות נעשה על ידי מינימיזציה של פונקצית השגיאה (הסטייה בין הערכים המחושבים לבין הערכים הנמדדים):

$$E(Q_G, Q_L) = \left[ \frac{\Delta P_{TP}^m - \Delta P_{TP}^P}{\Delta P_{TP}^m} \right]^2 + \left[ \frac{Q_V^m - Q_V^P}{Q_V^m} \right]^2 \quad (17)$$

האילוצים עבור המשוואה הם:  $Q_G \geq 0$  ו  $Q_L \geq 0$ . כאשר  $\Delta P_{TP}^P$  ו  $Q_V^P$  במשוואה (17) הם הפרש הלחץ דרך מד הספיקה ונטורי ואות היציאה ממד הספיקה Vortex בהתאמה המחושבים לפי המשוואות (הקורלציה עבור מד הספיקה ונטורי ומקדם התיקון עבור מד הספיקה Vortex) המוצגות בפרק 5.

בדרך כלל ביצועי המודל נבחנים על סמך ערכים נמדדים, אך חישוב שעורי הספיקה על ידי ממוצעי הקריאות לא יניב תוצאות מדויקות אלא תתקבל סטייה הנובעת מכך שאין קשר ליניארי בין האותות הנדגמים לבין הספיקות ולכן אומצה הפרוצדורה הבאה:

ראשית חושבו ספיקות הגז והנוזל מהקריאות המיידיות (ליתר דיוק נתוני הקריאות הנדגמים ממוצעים לאורך שניה) של המכשירים. לאחר מכן ממוצע של כל 100 חישובים הושווה עם ממוצע קריאות הסימוכין (100 קריאות). התהליך המתואר בוצע על ידי מודל שנכתב בתוכנת המחשב, כאשר מינימיזציה של השגיאה לקביעת הספיקות (משוואה 17) בוצעה על ידי תוכנית

כתובה בתוכנת  $\text{MATLAB}^{\text{®}}$  (The Math Works, Inc., USA) Optimization Toolbox.

## 6.1 בדיקת איכות התוצאות המתקבלות מהמודלים

בדיקת איכות התוצאות מתקבלת מהשוואת שברי הספיקה המחושבים (מתוך המודלים עבור זרימה דרך ה-WGM) לאלו הנמדדים בקווי הזרימה החד פאזיים. בדיקה זו נעשית על ידי חישוב הסטייה בין ערכי הספיקות במונחים של שגיאה אבסולוטית,  $\Delta_G$  ו  $\Delta_L$ , ושגיאה יחסית,  $\delta_G$  ו  $\delta_L$ :

$$\Delta_{G,L} = \left( \frac{1}{N} \sum E_{G,L,i}^2 \right)^{1/2} \quad \delta_{G,L} = \left( \frac{1}{N} \sum \varepsilon_{G,L,i}^2 \right)^{1/2} \quad (18)$$

כאשר

$$E_{G,L,i} = Q_{G,L,i}^r - Q_{G,L,i}^p \quad \varepsilon_{G,L,i} = \frac{Q_{G,L,i}^r - Q_{G,L,i}^p}{Q_{G,L,i}^r} \quad (19)$$

$Q_{Li}^r$  ו  $Q_{Gi}^r$  הם הספיקות האמיתיות הנמדדות בקווי הזרימה החד פאזיים,  $Q_{Li}^p$  ו  $Q_{Gi}^p$  הם הספיקות המנובאות על ידי המודל.

## 6.2 תוצאות

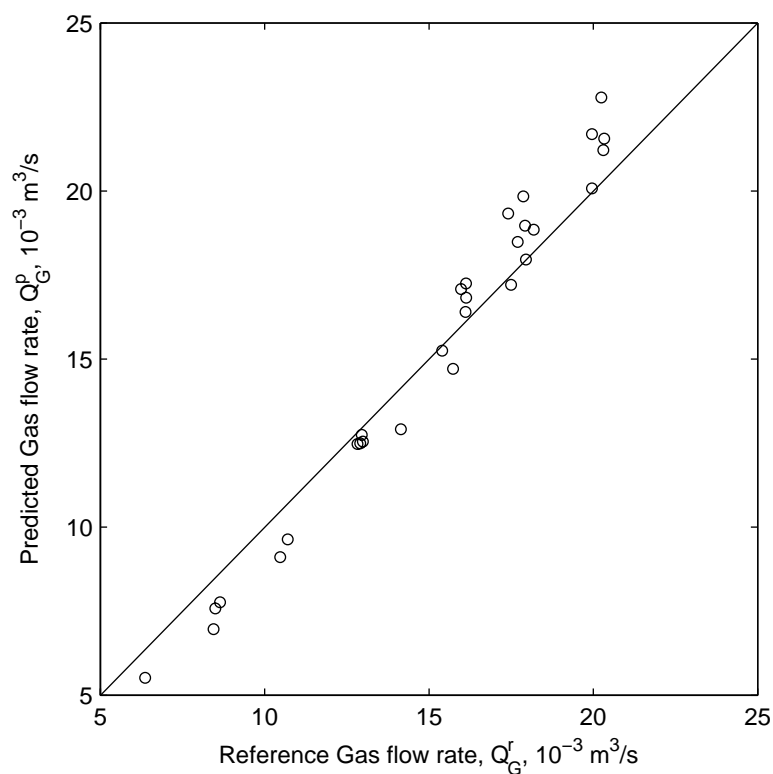
מסדרות הניסויים הובחן כי היישום עבור זרימת Wet Gas בתנאי לחץ אטמוספריים דרך מד הספיקה Vortex אינו מדויק ואף חסר משמעות (השגיאה בחיזוי אות היציאה ממד הספיקה Vortex כאשר משתמשים במשוואה (14) עבור מקדם התיקון מגיעה עד ל 13.6%). אף על פי כן נבדקו גם התוצאות מסדרות הניסויים אשר נערכו בלחץ נמוך על מנת להעריך את השילוב בין מד ספיקה ונטורי לבין מד הספיקה Vortex בתנאים אלו כאשר עבור מקדם התיקון שימשה משוואה (14).

הערכת איכות הניסויים כוללת תוצאות מסדרות ניסויים רק עבור נקודות הנמצאות בטווח הפעולה של מד הספיקה Vortex, כלומר רק עבור שברי גז מסים הגדולים מ 50%. באיורים 20 ÷ 17 מוצגות איכותן של התוצאות אשר עיקרן מתומצת בטבלה (2), במונחים של שגיאה אבסולוטית  $\Delta_G$  ו  $\Delta_L$ , ושגיאה יחסית,  $\delta_G$  ו  $\delta_L$ . דרך החישובים מפורטת בסעיף הקודם משוואות (18) ו (19).

טבלה 2: ביצועי מערכת למדידת זרימת Wet Gas המשלבת מד ספיקה ונטורי ומד ספיקה Vortex.

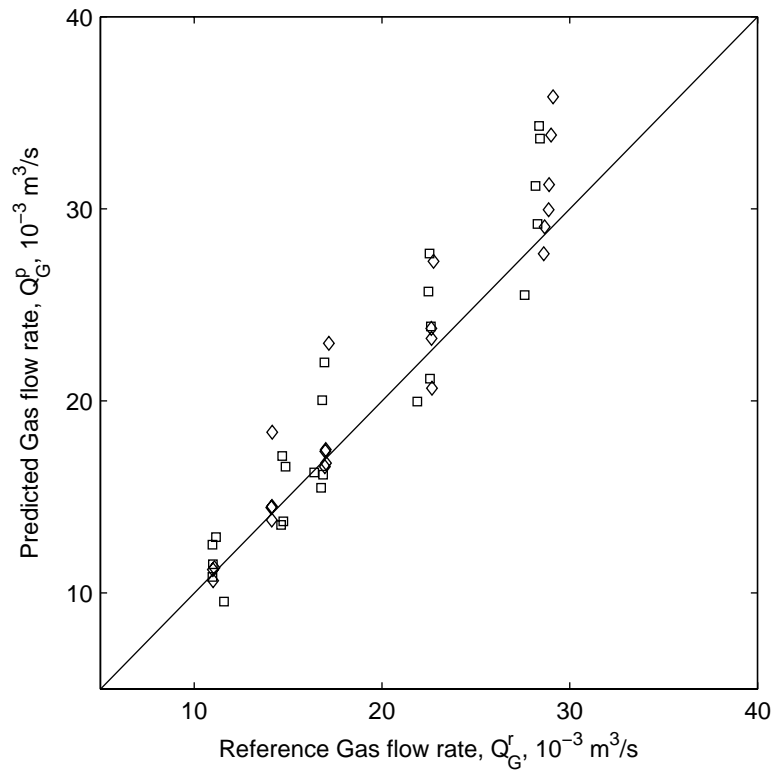
$\delta$	$\Delta$		פאזה	לחץ
	$\times 10^3 m^3/s$	% Full scale		
13.2	2.7	9.29	גז	גבוה
86.2	0.41	35.5	נוזל	
7.97	1.1	5.42	גז	נמוך
105	0.005	24.7	נוזל	

מאיור (18) ניתן לראות כי בלחץ עבודה גבוה המודל 'מתקשה' בחיזוי ספיקת הגז, השגיאה גדלה ומגיעה ל 30% כאשר איכות הזרימה (x) הולכת וקטנה כפי שניתן לראות מאיור (22) פרק 7. בניגוד לכך, התוצאות המחושבות בלחצים נמוכים הן בעלות דיוק גבוה כפי שניתן לראות מאיור (17) (השגיאה הנה מאותו סדר גודל של שגיאת מכשור המדידה) וזאת על אף אי הוודאות הגדולה בחיזוי אות היציאה ממד הספיקה Vortex.



איור 17: איכות תוצאות ערכי הספיקה

הנפחית של הגז, לחץ נמוך.

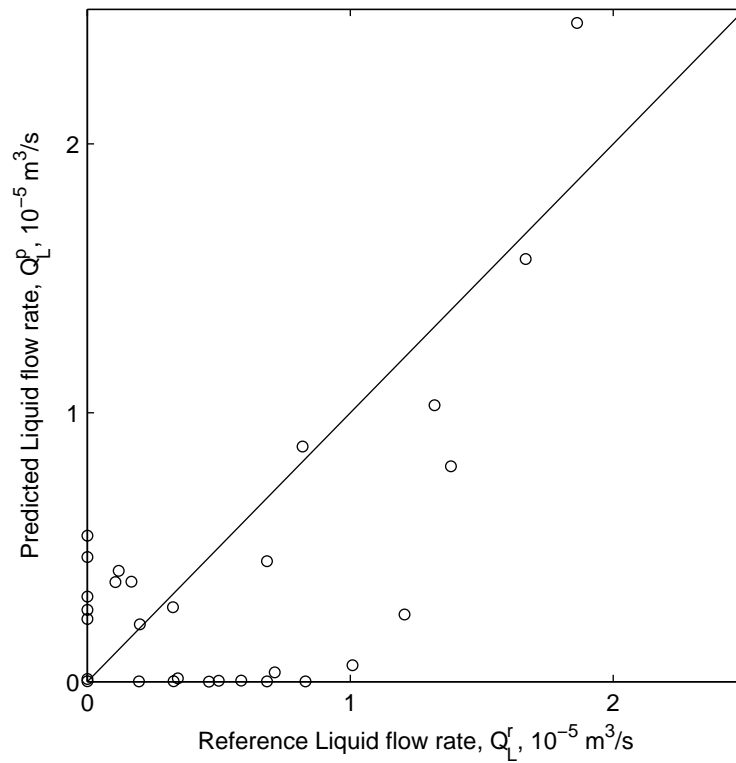


איור 18 : איכות תוצאות ערכי הספיקה

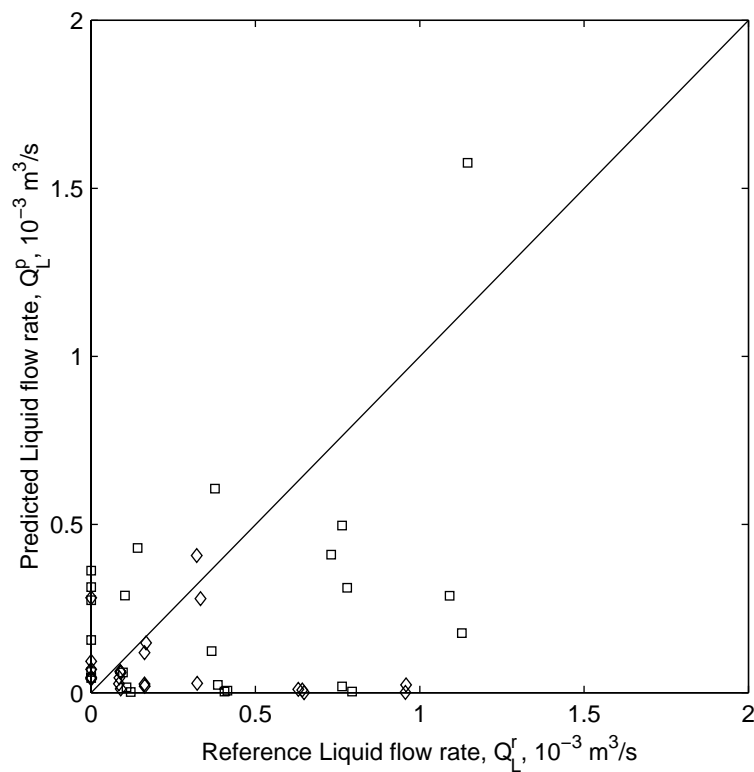
הנפחית של הגז, לחץ גבוה.

מקרא – ראה איור 12.

מאיורים (19) ו (20) רואים כי השילוב של מד ספיקה ונטורי עם מד הספיקה Vortex אינו מסוגל לחזות את ספיקות הנוזל אף על פי שביישומים אלו של מדידת זרימת Wet Gas החשיבות הגבוהה היא בניבוי ספיקת הגז השלטת. בנוסף יש לציין כי ספיקות הנוזל בניסויים שנערכו באוניברסיטת בן גוריון היו כה קטנות עד כי היה קשה למדוד אותן בצורה מדויקת אפילו בזרימה חד פאזית.



איור 19 : איכות תוצאות ערכי הספיקה הנפחית של הנוזל, לחץ נמוך.



איור 20 : איכות תוצאות ערכי הספיקה הנפחית של הנוזל, לחץ גבוה. מקרא – ראה איור 12.

## 7 אנליזה של השגיאה

מהניסויים ראינו כי מערכת המשלבת מד ספיקה ונטורי עם מד ספיקה Vortex אינה מספקת תוצאות משביעות רצון עבור טווח נתוני זרימה מגוון וזאת בניגוד לציפיות (ראה פרק 2 סעיף 2.3). בפרק זה נבצע הערכת שגיאה תיאורטית עבור המערכת ובנוסף נשווה את ביצועי המערכת הנחקרת בעבודה זו למערכת המשלבת שני מדי לחץ (Lund 1999). חשוב לציין כי חישוב השגיאה במדידות רב פאזיות קשה עד בלתי אפשרי זאת כיוון שהחישוב מתבצע עבור שילוב של משוואות לא ליניאריות אשר בדרך כלל מעריכות ביצועים באופן ניסיוני. אי לכך חישוב השגיאה בוצע בקירוב.

ניתן לראות את הביצועים של שילוב שני מכשירים המודדים הפרשי לחץ לפי המודל הבא, המניח כי מפל הלחץ בזרימה חד פאזית נתון על ידי משוואה עבור זרימה לא דחיסה, ללא הפסדי חיכוך, ומפל הלחץ בזרימה דו פאזית מתנהג בהתאם לקורלציית Murdock:

$$\begin{aligned} \sqrt{\Delta P_{TP,j}} &= \sqrt{\Delta P_{G,j}} + C_{M,j} \sqrt{\Delta P_{L,j}} \\ \Delta P_{ij} &= C_j^2 \rho_i Q_i^2 \quad i = G, L \quad j = V, PP \end{aligned} \quad (20)$$

$C_{PP}$  ו  $C_V$  הנם מקדמי הזרימה של הונטורי ושל ה 'Perforated Plate' בהתאמה.  $C_{M,PP}$  ו  $C_{M,V}$  הנם קבועי Murdock עבור מכשירים אלו. ומכאן קיבלנו מערכת בעלת שתי משוואות לקביעת ספיקת הגז והנוזל:

$$\begin{aligned} C_j \sqrt{\rho_G} Q_G + C_{M,j} C_j \sqrt{\rho_L} Q_L &= \sqrt{\Delta P_{TP,j}} \\ j &= V, PP \end{aligned} \quad (21)$$

על ידי פתרון צמד המשוואות (21) ניתן לקבל את ספיקת הגז הנפחית:

$$Q_G = \frac{\sqrt{\Delta P_{TP,V}} - \frac{C_{M,V} C_V}{C_{M,PP} C_{PP}} \sqrt{\Delta P_{TP,PP}}}{\left(1 - \frac{C_{M,V}}{C_{M,PP}}\right) C_V \sqrt{\rho_G}} \quad (22)$$



מהמשוואה האחרונה ניתן לראות כי הערכה נכונה של ספיקת הגז תתקבל אם לשני המכשירים יהיו מקדמי Murdock השונים משמעותית.

אם תגובת שני מכשירי המדידה לשינויים בלחץ זהה כלומר  $C_{M,V} \cong C_{M,PP}$ , אזי מערכת משוואות (21) תלויה ליניארית. במקרה זה שילוב שני המכשירים המודדים את הפרש הלחץ לא מתאים למדידת זרימה דו פאזית.

השגיאה היחסית עבור מדידת הספיקה הנפחית של הגז (משוואה 22) ובהנחה כי  $C_V = C_{PP}$  הנה:

$$\delta_{Q_G} = \frac{\delta_{\Delta P}}{2 \left| 1 - \frac{C_{M,V}}{C_{M,PP}} \right|} \sqrt{\left( 1 + C_{M,V} \frac{1-x}{x} \sqrt{\frac{\rho_G}{\rho_L}} \right)^2 + \left( \frac{C_{M,V}}{C_{M,PP}} \right)^2 \left( 1 + C_{M,PP} \frac{1-x}{x} \sqrt{\frac{\rho_G}{\rho_L}} \right)^2} \quad (23)$$

כאשר  $\delta_{\Delta P}$  הנה השגיאה היחסית של מדידת מפל הלחץ, זאת בהנחה כי השגיאה זהה עבור שני מכשירי המדידה.

לצורך המחשה, בהערכת השגיאה מתוך משוואה (22) עבור מערכת המדידה המורכבת משני מדי הלחץ כאשר  $C_{M,V} \approx 3$  ו  $C_{M,PP} \approx 1.3$  ובתנאי זרימה כפי שדווחו על פי Lund et al. (1999) מראה כי מקדם הגברת השגיאה עבור טווח רחב של לחצים הנו בעל סדר גודל של אחד, זאת עבור איכות זורם  $0.5 < x < 1$ . כלומר השגיאה בערך הספיקה הנה באותו סדר גודל של אי הוודאות בחיזוי מפל הלחץ כ- 4% (Lund et al. 1999).

בדומה למחקרם של Hussien and Owen (1991), ראינו כי מקדם התיקון עבור מד הספיקה Vortex באיכות גבוהה ( $x \sim 1$ ) מתנהג בהתאם לשורש הריבועי של האיכות. מכאן הספיקה הנמדדת על ידי מד הספיקה Vortex ניתנת למידול על ידי המשוואה הבאה:

$$W = C_{VM} \rho_G x^{-1/2} f \quad (24)$$

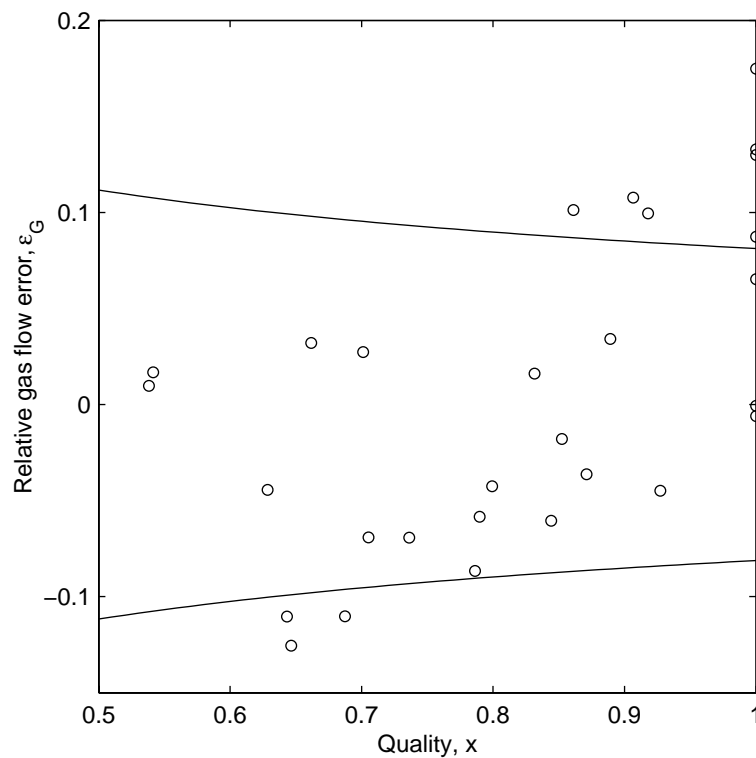
בעבודה זו שילבנו בין משוואה (21) עבור מד הספיקה ונטורי לבין משוואה (24) וקיבלנו מודל פשוט המהווה מערכת משוואות. ביצענו ליניאריזציה למשוואה (24), על ידי קירוב מקדם התיקון במשוואה לטור טיילור ובהנחה כי ערך האיכות שואף לאחד,  $x^{1/2} = 1/2(x+1)$ . הפתרון המתקבל עבור ספיקת הגז:

$$Q_G = \frac{\sqrt{\Delta P_{TP}} - 2C_{M,V}C_V C_{VM} \frac{\rho_G}{\sqrt{\rho_L}} f}{\rho_G C_V \left( \frac{1}{\sqrt{\rho_G}} - 2 \frac{C_{M,V}}{\sqrt{\rho_L}} \right)} \quad (25)$$

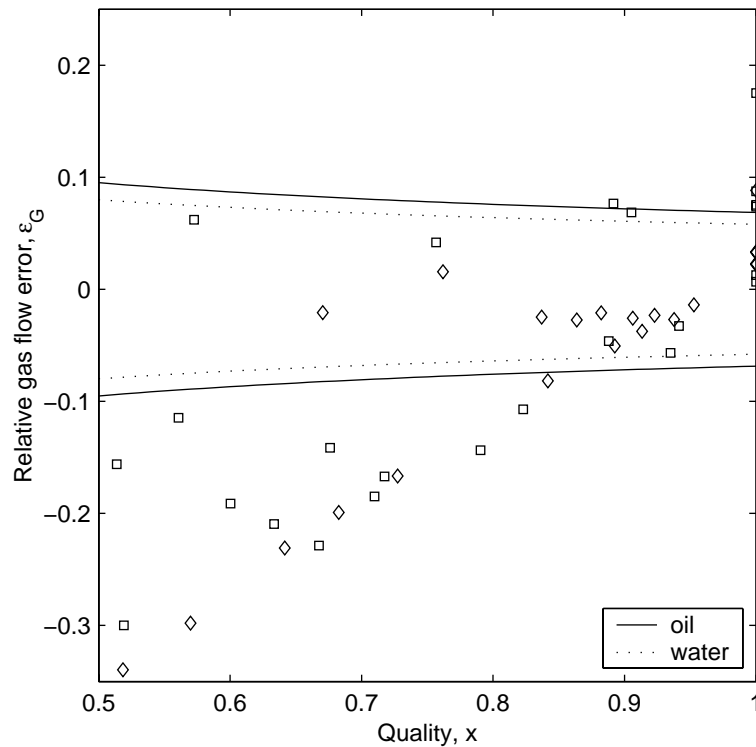
הביטוי עבור השגיאה היחסית בחישוב ספיקת הגז ממשוואה (25) הוא:

$$\delta_{Q_G} = \frac{1}{\left| 1 - 2C_{M,V} \sqrt{\frac{\rho_G}{\rho_L}} \right|} \sqrt{\left( 1 + C_{M,V} \frac{1-x}{x} \sqrt{\frac{\rho_G}{\rho_L}} \right)^2 \frac{\delta_{\Delta P}^2}{4} + \frac{4C_{M,V}^2 \rho_G}{x \rho_L} \delta_f^2} \quad (26)$$

כאשר  $\delta_{\Delta P}$  ו  $\delta_f$  הן השגיאות היחסיות בחישוב מפל הלחץ ותדירות נשירת המערבולות מגוף מד Vortex. משוואה (26) מראה כי ביצועי המערכת תלויים ביחס הצפיפויות בין הגז לנוזל, דיוק נמוך מתקבל כאשר  $\rho_L / \rho_G \cong 4C_{M,V}^2$ . איורים (21) ו (22) מתארים שגיאה מחושבת לפי משוואה (26) ביחד עם השגיאות האמיתיות.



איור 21: השגיאה היחסית בערך הספיקה המסית של הגז (לחץ נמוך), תחומה על ידי גבולות משוואה השגיאה (13).



איור 22 : השגיאה היחסית בערך הספיקה  
 המסית של הגז (לחץ גבוה), תחומה  
 על ידי גבולות משוואה השגיאה (13).  
 מקרא – ראה איור 12.

הן מטבלה 2 (פרק 6) והן מאיור (22) ניתן לראות כי בעבודה ביחס צפיפות גז נוזל גבוה השגיאה גדלה עד למעלה מ 30% עם הירידה באיכות הזרימה,  $x$ . בנוסף השגיאה היחסית גדולה פי כחמישה משגיאת מכשור המדידה (2.5%). בניגוד לכך בעבודה ביחס צפיפות גז נוזל נמוך השגיאה בחיזוי הספיקה הנה מאותו סדר גודל של שגיאת המכשור האינדיבידואלי קרי מד הספיקה Vortex.

משתמע מהתוצאות כי הערכת השגיאה נכונה וכי שילוב של מד ספיקה Vortex ומד ספיקה ונטורי בחיזוי ספיקת הגז בזרימה דו פאזית אכן תלוי ביחס הצפיפויות גז נוזל, כאשר השגיאה גדלה עם העלייה בערכו של היחס ביניהן.

## 8 סיכום ומסקנות

בעבודה נבדק תפקודם של מד ספיקה ונטורי ומד ספיקה Vortex בזרימת Wet Gas. בנוסף נחקרה מערכת למדידת זרימת Wet Gas המשלבת בין שני המכשירים. עלות שני מכשירים אלו זולה יחסית לאמצעי מדידה אחרים המשמשים למטרה זו, אמינותם גבוהה במדידת ספיקות חד פאזיות ובנוסף עיקרון פעולתם השונה אמור למנוע תלות ליניארית בין קריאות המכשירים. עבור בדיקת המכשירים ושילובם נבנתה מערכת ניסוי. על סמך תוצאות הניסויים נקבעה קורלציה המתארת בצורה הטובה ביותר את הקשר בין מפל הלחץ הדו פאזי,  $\Delta P_{TP}$ , דרך מד הספיקה ונטורי לבין מפל הלחץ דרכו במידה והזרימה הייתה חד פאזית,  $\Delta P_G$  ו  $\Delta P_L$ . בנוסף נבדקה גם התנהגות מקדם התיקון עבור מד הספיקה Vortex. נכתבה תוכנית מחשב עבור המודל המחשב את ספיקות הפאזות על ידי שילוב בין הקורלציות שנקבעו עבור שני המכשירים. לאחר קביעת ספיקות מרכיבי הזרימה, נוזל וגז נבדקה התאמתם לספיקות הידועות אשר נקבעו בקווי הזרימה החד פאזית, במערכת הניסוי המעבדתית. הנתונים נדגמו במערכת הניסוי אשר נבנתה לצורך עבודת מחקר זו, בנוסף התקבלו נתונים מניסויים שנערכו על ידי תאגיד אגר.

מסדרות הניסויים נמצא כי הקורלציה של Chisholm (1967) מתארת בצורה הטובה ביותר את הקשר בין מפל הלחץ הדו פאזי המחושב על ידי המודל לבין מפל הלחץ הנמדד בזרימה דרך מד הספיקה ונטורי.

עוד נמצא כי באיכות זרימה של למעלה מ 80%, ניתן לבטא את אות היציאה ממד הספיקה Vortex במונחים של איכות הזרימה, כאשר עבור שברי ספיקת גז נמוכים ( $x < 0.5$ ) אות היציאה ממד הספיקה Vortex אינו סדיר ואי לכך לא ניתן להשתמש בו במדידת הזרימה. בנוסף הובחן כי מד הספיקה Vortex אינו רגיש להופעת הנוזל בזרימה בלחצי עבודה נמוכים, אף על פי כן דרושה חקירה נוספת של המכשיר בלחצים נמוכים הכוללת את השפעת עיבוד אות המוצא של המכשיר על ביצועי מד הספיקה Vortex. עבור איכויות זרימה בטווח הביניים (בין 50% ל 80%), מד הספיקה Vortex הניב תוצאות בעלות משמעות. אף על פי כן יש להמשיך ולחקור את ביצועי המכשיר בטווח איכות זה בלחצי עבודה מגוונים.

תוצאות החישובים:

מערכת המשלבת בין מד ספיקה ונטורי לבין מד ספיקה Vortex אינה מניבה תוצאות מספקות עבור חיזוי ספיקות המרכיבים בעבודה ביחס צפיפויות גז נוזל גבוה, כלומר אינה מתאימה עבור תהליכים הקשורים בתעשיית הנפט אך יעילה בתהליכים/יישומים בהם קיים יחס צפיפויות גז נוזל נמוך. אנליזת השגיאות מספקת הסבר לתוצאות.

## הקורלציות של Chisholm ו Murdock

יש לציין כי הקורלציה של Murdock (1962) הייתה הראשונה מסוגה, כאשר הקורלציה של Chisholm (1967) שיפרה את הקורלציה של Murdock וזאת על ידי התחשבות בכוחות הגזירה בין הפאזות.

הקורלציה של Murdock התקבלה בהנחת זרימת נוזל דרך מכשור מדידה דיפרנציאלי אופקי אידיאלי בהנחת התנאים הבאים:

1.  $\beta=0$  (היחס בין קוטר ההצרה לקוטר הכניסה) ומכאן ניתן לקרב את מהירות הזורם בכניסה לאפס.
2. מקדם כיווץ המדיד שווה לאחד (השטח הקטן ביותר אותו תופס הזורם, *vena contracta*, זהה לקוטר ההצרה).
3. הזרימה הנה ללא חיכוך כך שמקדם הפריקה שווה לאחד.
4. הזורמים, נוזל או גז, אינם דחיסים.

מכאן ועל פי ההנחות ניתן לבטא את משוואת התנועה:

$$\frac{dP}{\rho} + Vdv = 0 \quad (1.1)$$

מאינטגרציה של המשוואה מתקבל הפתרון עבור מהירות הזורם:

$$V = \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho}} \quad (1.2)$$

ספיקת הזורם מתקבלת עם הצבת משוואה (1.2) עבור  $V$  במשוואת הרציפות ( $W = \rho VA$ ):

$$W = A\sqrt{2\rho\Delta P} \quad (1.3)$$

ממשוואה (1.3) עבור זרימת נוזל או גז בנפרד דרך מכשיר המדידה מתקבל:

עבור הנוזל:

$$W_L = A\sqrt{2\rho_L\Delta P_L} \quad (1.4)$$

עבור הגז:

$$W_G = A\sqrt{2\rho_G\Delta P_G} \quad (1.5)$$

כעת בהנחת זרימה בו זמנית של נוזל וגז דרך מכשיר המדידה, שטח הזרימה דרך המכשיר הנו השטח התפוס הן ע"י הנוזל והן ע"י הגז:

$$A = A_L + A_G \quad (1.6)$$

כאשר הפרש הלחצים הנו זהה עבור שני הזורמים:

עבור הנוזל:

$$W_L = A_L\sqrt{2\rho_L\Delta P_{TP}} \quad (1.7)$$

עבור הגז:

$$W_G = A_G\sqrt{2\rho_G\Delta P_{TP}} \quad (1.8)$$

ע"י בידוד  $A_L$  ו  $A_G$  ממשוואות (1.7) ו (1.8) והצבתם במשוואה (1.6) נקבל:

$$A = \frac{W_L}{\sqrt{2\rho_L\Delta P_{TP}}} + \frac{W_G}{\sqrt{2\rho_G\Delta P_{TP}}} \quad (1.9)$$

כעת נציב את  $W_G + W_L$  ממשוואות (1.4) ו (1.5):

$$A = \frac{A\sqrt{2\rho_L\Delta P_L}}{\sqrt{2\rho_L\Delta P_{TP}}} + \frac{A\sqrt{2\rho_G\Delta P_G}}{\sqrt{2\rho_G\Delta P_{TP}}} \quad (1.10)$$

ולאחר צמצום וסידור המשוואה נקבל את משוואה (1.11):

$$\sqrt{\frac{\Delta P_{TP}}{\Delta P_G}} = \sqrt{\frac{\Delta P_L}{\Delta P_G}} + 1 \quad (1.11)$$

כאשר מתחשבים בכוחות החיכוך על הדופן ובכך שהזורם מתכנס לשטח זרימה קטן יותר לאחר המעבר בשטח החתך של נחיר האוריפיס (vena contracta), הנוסחה עבור הספיקה דרך מכשיר המדידה:

$$W = AKY\sqrt{2\rho\Delta P} \quad (1.12)$$

כאשר משתמשים באותה גישה אשר ננקטה עבור זרימה אידיאלית בהנחת מקדם התפשטות עבור הנוזל,  $Y=1$ :

$$W_L = AK_L\sqrt{2\rho_L\Delta P_L} \quad (1.13)$$

$$W_G = AK_G Y_G\sqrt{2\rho_G\Delta P_G} \quad (1.14)$$

$$W_L = A(K_L)_{TP}\sqrt{2\rho_L\Delta P_{TP}} \quad (1.15)$$

$$W_G = A_G(K_G Y_G)_{TP}\sqrt{2\rho_G\Delta P_{TP}} \quad (1.16)$$

ע"י הצבת משוואות (1.13)-(1.16) לתוך משוואה (1.6) ולאחר מספר פעולות אלגבריות נקבל את המשוואה חסרת היחידות הבאה:

$$\sqrt{\frac{\Delta P_{TP}}{\Delta P_G}} = \frac{K_L}{(K_L)_{TP}}\sqrt{\frac{\Delta P_L}{\Delta P_G}} + \frac{K_G Y_G}{(K_G Y_G)_{TP}} \quad (1.17)$$

מאנליזה של נתונים מניסויים מתקבלת משוואה (3) (פרק 2).

Chisholm (1967) התחשב גם בכוחות הגזירה בין הפאות והוסיף אותם למשוואה (1.2) ועל ידי פיתוח בצורה זהה ועבור אותן הנחות מתקבלת משוואה (6) (פרק 2).



## רוטמטר, עיקרון פעולה כללי

שעור הזרימה פרופורציונלי באופן ישיר לשטח המדיד באזור הקריאה, האזור בו נמצא המצוף, (ראה עמוד 86, Fluid meter, ASME (1959)). שינוי גובה המצוף תלוי בשיעור משקל הזרימה. מדידים אלו מכוונים כך שהמצוף ינוע בצורה אנכית (ראה איור 23) עם התנגדות חיכוך מינימלית. המצוף מראה אינדיקציה או את שעור הזרימה דרך המדיד מהסתכלות ישירה במכשיר המדידה. הקשר בין מיקום המצוף לבין שעור הזרימה מתבסס על כיול, אם צפיפות הזורם ששימש לכיול זהה לצפיפות הזורם אותו מודדים המדידה תהיה מיידית. אך כאשר לזורם הנמדד צפיפות שונה מזו שעבורה כוילה המערכת, יש לקחת שינוי זה בחשבון (בייחוד כאשר מדובר בגזים).

### פיתוח המשוואה הלוקחת בחשבון את השינויים במשקל הסגולי של הזורם הנמדד

בהזנחת חיכוך הנוזל על פני שטח המצוף, הכוח אשר מרים את המצוף אקוויוולנטי לקצב שינוי התנע של הזורם בין חתך  $A_1$  (שטח הכניסה התחתון של המדיד) לחתך  $A_2$  (השטח הטבעתי סביב המצוף) ומאזן את כוח הגרוויטציה על המצוף,  $mg$ , ומכאן:

$$W_s (V_2 - V_1)_s = mg = W_a (V_2 - V_1)_a \quad (2.1)$$

כאשר  $W$  היא ספיקת הזורם,  $m$  היא מסת המצוף,  $V_1$  היא מהירות הזורם לרוחב  $A_1$  ו  $V_2$  היא מהירות הזורם לרוחב  $A_2$ . האינדקס  $s$  מתייחס לתנאים בעת כיול המערכת ואינדקס  $a$  לתנאים בזמן המדידה.

בהנחה שצפיפות הנוזל,  $\rho$ , קבועה בין החתך  $A_1$  לחתך  $A_2$  -

$$V_1 = \frac{W}{\rho A_1} \quad V_2 = \frac{W}{\rho A_2} \quad : W = AV\rho \quad (\text{משוואת הרציפות}) \quad (2.2)$$

$$W_s \frac{W_s}{\rho_s} \left( \frac{1}{A_2} - \frac{1}{A_1} \right)_s = W_a \frac{W_a}{\rho_a} \left( \frac{1}{A_2} - \frac{1}{A_1} \right)_a \quad (2.3)$$

כאשר עבור אותה סקלת מדידה:

$$\left( \frac{1}{A_2} - \frac{1}{A_1} \right)_s = \left( \frac{1}{A_2} - \frac{1}{A_1} \right)_a \quad (2.4)$$

ומכאן:

$$\frac{W_s^2}{\rho_s} = \frac{W_a^2}{\rho_a} \quad (2.5)$$

כאשר:

$$W_s = \rho_s \cdot Q_s \quad W_a = \rho_a \cdot Q_a \quad (2.6)$$

ומכאן:

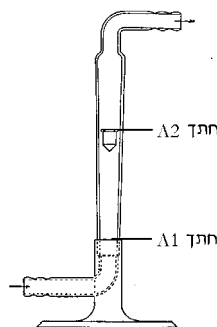
$$Q_a = Q_s \sqrt{\frac{\rho_s}{\rho_a}} \quad (2.7)$$

$Q_s$  ו  $Q_a$  הן הספיקות הנפחיות עבור בצפיפויות  $\rho_s$  ו  $\rho_a$  בהתאמה.

עבור גזים בלבד (בהנחת גזים אידיאליים):

$$\rho_g = \frac{P_g}{R_g T_g} \quad (2.8)$$

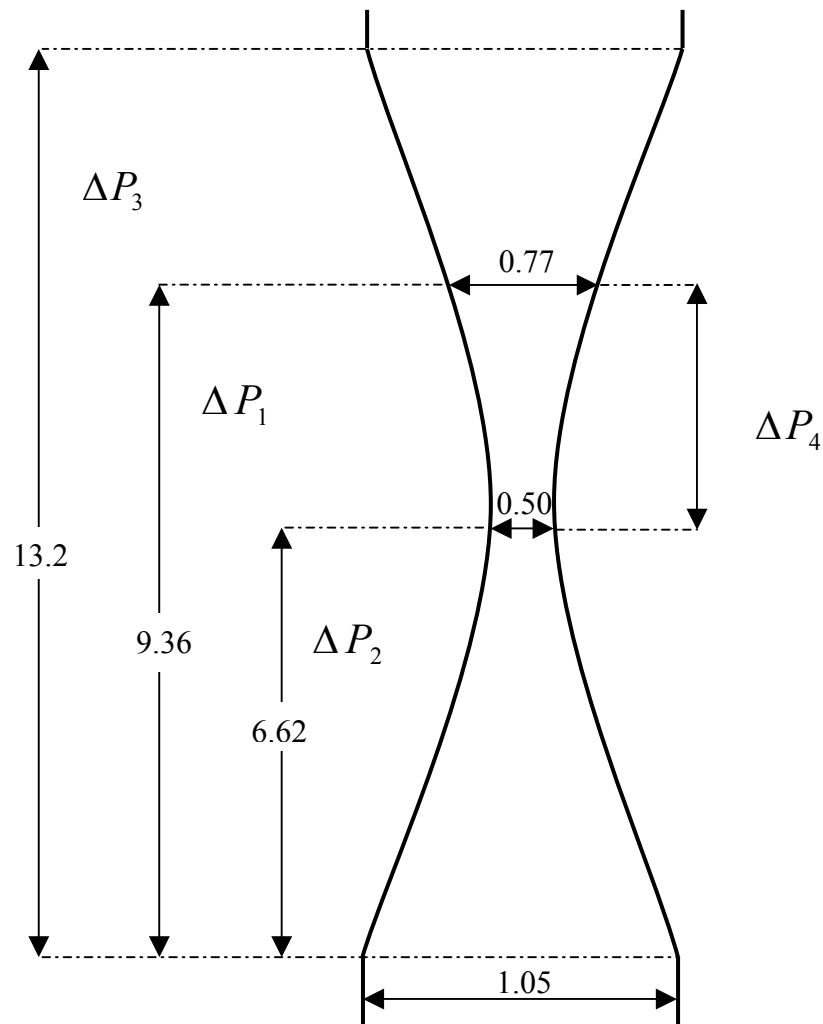
בהצבת משוואה (2.8) במשוואה (2.7) מתקבלת משוואה (11) (פרק 3).



איור 23: רוטמטר, מבנה פנימי.

מד ספיקה ונטורי 1"

כל המידות ב - inch.



## רשימת מקורות

- ASME (1959) Fluid meters: their theory and application. ASME, New York.
- Aya I (1975) A model to calculate mass flow rate and other quantities of two-phase flow in a pipe with a densitometer, a drag disk, and a turbine meter. ORNL-TM-4759
- Beck MS, Plaskowski A (1987) Cross-correlation flowmeters: their design and application, Adam Hilger, IOP Publishing, Bristol
- Carofano GC, McManus HN (1969) An analytical and experimental study of the flow of air-water and steam-water mixtures in a converging-diverging nozzle. Prog Heat Mass Trans 2: 395-417
- Chisholm D (1967) Flow of incompressible two-phase mixtures through sharp-edged orifices. J Mech Eng Sci 9
- Coney MWE (1973) The theory and application of conductance probes for the measurement of liquid film thickness in two-phase flow. J Phys E: Sci Instrum 6: 903-911
- Danesh A (1998) PVT and phase behaviour of petroleum reservoir fluids. Elsevier Science, Amsterdam
- Daniel P, Tudge M, Lund J (2000) A Venturi based wet gas meter with on-line gas mass fraction estimation. 18th North Sea Flow Measurement Workshop, Perthshire, Scotland
- Dykesteen E (1992) Multiphase metering. Chem Eng Res Des 70 (1): 32-37
- Elperin T, Fominykh A, Klochko M (2002) Performance of a Venturi meter in gas-liquid flow in the presence of dissolved gases. Flow Meas Instrum 13 (1-2): 13-16
- Fischer C (1994) Development of a metering system for total mass-flow and compositional measurements of multiphase multicomponent flows such as oil/water/air mixtures. Flow Meas Instrum 5 (1): 31-42
- Foussat AJM, Hulin JP (1984) Vertical liquid-liquid and liquid-gas two-phase flow measurements with a vortex flowmeter. In: Delhaye JM, Cognet G (eds) Measuring Techniques in Gas-Liquid Two-Phase Flows, Springer-Verlag, Berlin, pp 651-676
- Hulin JP, Fierfort C, Coudol R (1982) Experimental study of vortex emission behind bluff obstacles in a gas liquid vertical two-phase flow. Int J Multiphase Flow 8 (5): 475-490
- Hussein IB, Owen I (1991) Calibration of flowmeters in superheated and wet steam. Flow Meas Instrum 2: 209-215

- Kamath PS, Lahey RT Jr (1980) A turbine-meter evaluation model for two-phase transients. *J Heat Trans-T ASME* 102 (1): 9-13
- Koskie JE, Mudawar I, Tiederman WG (1989) Parallel-wire probes for measurement of thick liquid-films. *Int J Multiphase Flow* 15 (4): 521-530
- Lin ZH (1982) Two-phase flow measurements with sharp edged orifices. *Int J Multiphase Flow* 8 (6): 683-693
- Lund JS, Tait AR, Clark S (1999) A wet gas meter for gas/condensate flow measurement. 9<sup>th</sup> *Int Conf Multiphase Technology, Cannes, France*, pp 303-315
- Millington B (1997) Multiphase flow metering: a review. *J Offshore Technology* 5 (4): 18-21 1997
- Murdock JW (1962) Two-phase flow measurement with orifices. *J Basic Engng*, pp 419-433
- Ogawa Y, Kawaoto H, Gu RL, Yamashita M, Shoda S (1998) Measurement of multiphase flow using a turbine flow meter. In: *Proc 3<sup>rd</sup> Int Conf Multiphase Flow, Lyon, France*, paper 146
- Reimann J, John H, Muller U (1982) Measurements of two-phase mass flow rate: a comparison of different techniques. *Int J Multiphase Flow* 8 (1): 33-46
- Smith RV, Leang JT (1975) Evaluations of correlations for two-phase flowmeters three current – one new. *J Eng Power-T ASME* 97 (4): 589-595
- Steven RN (2002) Wet gas metering with a horizontally mounted venturi meter. *Flow Meas Instrum* 12 (5-6): 361-72
- Wallis GB, Sullivan DA (1972) Two-phase air-water nozzle flow. *J Basic Engng* 94: 788-794

## Abstract

Most flows in nature and in industrial processes are multi-phase flows. Hence there is a significant scientific and engineering interest in better predicting the properties of such flows, in general and the flow rates, in particular. The state-of-the-art of multi-phase flow meters enables predicting the flow rates of the various phases with accuracy of 20%, and in wet gas flows - 10%.

In the current research the performances of Venturi and Vortex flow meters in a wet gas flow were examined. In addition, a multi-phase system, which consists of both instruments for predicting wet gas flows, was examined as well.

A 1-inch diameter loop system was constructed for this goal and experiments were performed at atmospheric pressure. In addition, we used experimental data obtained using a similar 4-inch system, by Agar Corporation.

It was found that the output signal of the Vortex meter is irregular and meaningless when the flow quality is below 50%, hence all calculations were performed only for experiments in which the flow quality was above 50%.

It was found that in high-pressure tests the correction factor acts according to the flow quality, as was proposed by Hussein and Owen (1991). At atmospheric pressure the specific Vortex meter that was examined in this research was found to be insensitive to the liquid presence in the flow.

It was found that when the flow quality was higher than 50%, Chisholm's correlation describes well the relationship between the two-phase pressure drop and the single-phase pressure drops assuming that only one phase flows through the Venturi meter.

A mathematical model was suggested for predicting the response of the individual instruments in wet gas flow, which was used in the wet gas flow-metering model.

It was concluded that a combination of Venturi and Vortex flow meters for predicting the flow rates of wet gas flow yields inadequate results at high-pressures. Nevertheless, at low-pressures the accuracy of the results is of the same order as the error of the individual instruments. Error analyses were performed in order to provide an explanation of the results.

Combination of the Venturi and Vortex flow meters for wet gas measurements does not perform well in the whole range of parameters. Therefore it is important to account for the operational pressure when designing a system that combines Venturi and Vortex meters.



**Ben-Gurion University of the Negev  
Faculty of Engineering Sciences  
Department of Mechanical Engineering**

# **Investigation of a combined Venturi and Vortex meters system for Wet-Gas Flow metering**

**Thesis submitted in partial fulfillment of the  
requirements for the M.Sc. degree**

**By: Assaf Formoza**

**Supervisors: Prof. Gabi Ben-Dor  
Prof. Tov Elperin**

**February 2004**



**Ben-Gurion University of the Negev  
Faculty of Engineering Sciences  
Department of Mechanical Engineering**

**Investigation of a combined Venturi and  
Vortex meters system for Wet-Gas Flow  
metering**

**Thesis submitted in partial fulfillment of the  
requirements for the M.Sc. degree**

**By: Assaf Formoza**

February 2004