



התחנה
לחקר
הסחף



האגף לשימור קרקע וניקוז
משרד החקלאות ופיתוח הכפר

HydroVision

שימוש ב- ADCP למדידת ספיקה בנחלים

יניב מונבז

המחלקה לגאוגרפיה ופיתוח סביבתי, אוניברסיטת בן-גוריון בנגב

yaniv.monbaz@gmail.com



פברואר 2012

שבט תשע"ב

הבעת תודה

אני מודה לחברת SEBA Hydrometrie ולחברת HydroVision שקיבלו אותי לשלושה חודשי התמחות בהידרומטריה, כאשר חלק מההתמחות היה בנושא ADCP. הייתה זו חוויה מיוחדת ללמוד את הנושא מטובי המומחים ועל כן תודה מיוחדת ל- Wolfgang Zasche, Rudolf Duster וד"ר Juergen Skriplle על הדרכתם ותמיכתם בפרויקט. תודות לכל עובדי החברה שלקחו חלק בפרויקט, ביניהם: Astrid Zimmermann, Christian Weber, Marius Cecon, Manfred Haug ו-Marcus Schuster. תודה מיוחדת ל- Peter Krueger שליווה את עבודת השטח בתנאים של חורף אירופאי- למדתי ממך רבות.

תודה למשרד המדע הגרמני ולנציגו, ד"ר Hans Joachim Metzger, למימון השהייה בגרמניה בזמן ההתמחות.

תודה רבה לפרופ' יונתן לרון על התמיכה, ההכוונה והביקורת הבונה.

תודה לדניאל זמלר על ההערות הבונות.

תודות לתחנה לחקר הסחף על התמיכה בכתיבת הדו"ח ולד"ר רועי אגוזי על הנכונות לשיתוף פעולה בהכנת דו"ח משותף בעברית בנושא ADCP, בתקווה שמכשיר זה יהיה נגיש יותר למשתמשים בישראל.

יניב

תוכן עניינים

1	הקדמה	1
2	עקרונות השיטה	2
13	מאפייני ההחזר	3
15	אקסטרפולציות לאזורים בהם אין מדידות בפועל	4
18	אי דיוקים במדידה	5
18	5.1 אי דיוקים אקראיים	5.1
18	5.2 אי דיוקים בעלי תבנית מתמטית שחוזרת על עצמה	5.2
19	5.2.1 גורמים המשפיעים על מהירות הקול	5.2.1
20	5.2.2 תנועת תשתית	5.2.2
20	5.2.3 ריכוז רחופת ובועות	5.2.3
21	5.2.4 מרווח זמן בין פעימות	5.2.4
21	5.2.5 אקסטרפולציה	5.2.5
22	6 מגבלות	6
24	7 כיוול	7
25	8 אופני עבודה	8
26	9 שימושים נוספים	9
26	9.1 הערכת מהירות תנועת גרופת	9.1
26	9.2 הערכת ריכוז רחופת	9.2
26	9.3 הערכת מערבליות	9.3
27	10 השוואה בין שני מכשירי ADCP :StreamPro ו-QLiner, בתעלה מלאכותית	10
29	11 השוואה בין StreamPro למד זרם מדחף ומד זרם אלקטרומגנטי בנחל טבעי	11
29	11.1 רקע	11.1
29	11.2 מדידה ועיבוד נתונים	11.2
32	11.3 תוצאות	11.3
33	11.4 מסקנות	11.4
34	12 ביבליוגרפיה	12
37	נספח 1: דגשים להפעלה נכונה של המכשיר	37
38	נספח 2: מדדי איכות	38

רשימת איורים

- איור שער: מכשיר StreamPro של חברת SEBA בעת מדידה בנחל Wertach, גרמניה, 23.12.2010
- איור 1: דוגמה למדידה במכשיר ADCP מסוג StreamPro בתוכנת WinRiver. 2
- איור 2: מאפייני גלים. 3
- איור 3: הסט דופלר. 4
- איור 4: קרן של גלי קול המשודרת ממכשיר ADCP וחלקיקים מרחפים שגורמים להחזר גלי הקול. 5
- איור 5: זווית A בין ווקטור התנועה העיקרי של החלקיקים ובין הקו שבין ADCP והחלקיקים. 6
- איור 6: השפעת זוויות תנועה על עוצמת אפקט דופלר. 7
- איור 7: הפרש מופע (פאזה) בהחזר מעצם ללא תנועה. 8
- איור 8: חלקיק ללא תנועה בהשוואה לחלקיק בתנועה. 8
- איור 9: פעימה משודרת והחזר מורכב. 9
- איור 10: ארבע קרניים במכשיר ADCP של TRDI. 10
- איור 11: פעימה ארוכה המשודרת לאיתור הקרקעית. 11
- איור 12: רעש עצמי הנוצר כתוצאה ממעבר שתי פעימות אחת על גבי השניה במכשיר מדגם פס רחב. 12
- איור 13: מאפייני התדירות של האות החוזר. 13
- איור 14: קרניים משניות ואזורים ללא מדידה. 14
- איור 15: אזורים בהם אין מדידות בפועל ויש צורך בהערכות בהסתמך על המדידות. 15
- איור 16: אקסטרפולציה בשיטת שישית החזקה. 16
- איור 17: הערכת מהירות זרימה ושטח חתך בסמוך לגדות. 17
- איור 18: צמצום הטעות האקראית ע"י מיצוע כמות גדולה של נתונים. 18
- איור 19: השפעת שינויים במהירות הקול על פיזור קרני הקול. 20
- איור 20: השוואת חתכי זרימה בתעלה שנמדדו ע"י מד זרם מכני, StreamPro ו-QLiner. 28
- איור 21: השוואת מהירות זרימה ממוצעת בחתכים שנמדדה ע"י מד זרם מכני, StreamPro ו-QLiner. 28
- איור 22: מיקום המדידות לאורך נחל Wertach בסמוך לכפר Pforzen. 30
- איור 23: מדידה באמצעות StreamPro ADCP. 31
- איור 24: חתך הרוחב ומיקום המדידות. 31
- איור 25: חתך הזרימה כפי שנמדד ב- StreamPro ADCP בשיטת הסעה רציפה. 32
- איור 26: דוגמה לחתכים בהם אנכים לא נמדדו עקב חוסר יכולת למדוד קרקעית או מערבולות גבוהה. 39
- איור 27: קפיצות בפרופיל המהירות. 39
- איור 28: פרופיל החזרה תקין ופרופיל החזרה לא תקין. 40
- איור 29: פרופיל החזר מופרע שמרמז על בעיה במדידה. 40
- איור 30: מהירות חצייה לא אחידה וגבוהה ממהירות הזרימה הממוצעת. 41
- איור 31: פרופיל תשתית הנראה בלתי אחיד. 41

רשימת טבלאות

- טבלה 1: הבדלים במהירות זרימה במיקום ספציפי 33
- טבלה 2: ספיקה כוללת, שטח חתך ומהירות ממוצעת 33

רשימת משוואות

- משוואה 1: מהירות הקול כתלות בתדירות ובאורך 3
- משוואה 2: הסט דופלר 4
- משוואה 3: הסט דופלר כאשר החיישן והקולטן במיקום זהה 5
- משוואה 4: הסט דופלר בתוספת תיקון לזווית חיישן 5
- משוואה 5: פרופיל שישית החזקה 15
- משוואה 6: הערכת מהירות בסמוך לגדות 16
- משוואה 7: הערכת מהירות בסמוך לגדות בפרופיל משולש 16
- משוואה 8: משוואה אמפירית לחישוב מהירות הקול 19
- משוואה 9: תיקון אורך התא הנמדד כתלות במהירות הקול 19
- משוואה 10: תיקון מהירות הזרימה הנמדדת כתלות במהירות הקול 19

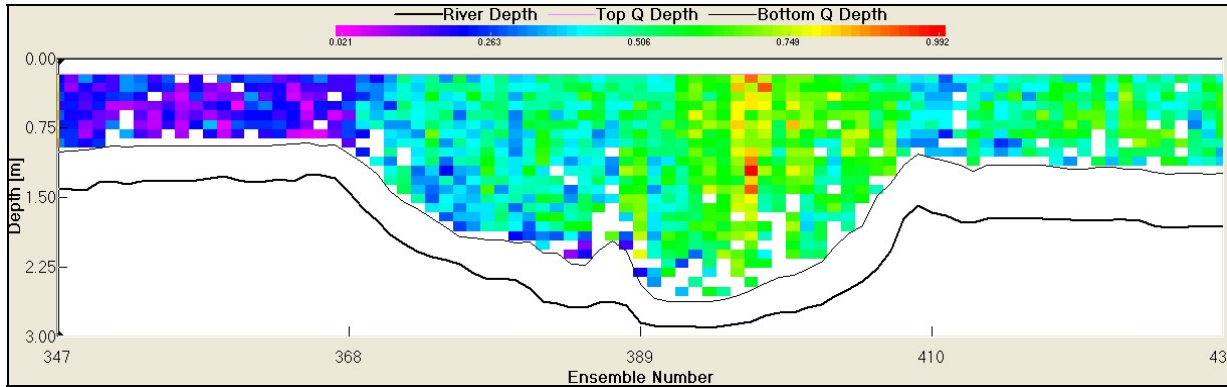
1. הקדמה

בשנים האחרונות גובר השימוש במכשירים מסוג ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler) למדידת פרופילי מהירות הזרימה בחתך רוחב וחישוב הספיקה בנחלים. היכולת הטכנולוגית של המכשיר למדוד את פרופילי מהירות הזרימה לרוחב כל החתך בזמן קצר יחסית תוך הצגת חישובי ספיקה, מהירות ממוצעת ושטח חתך בזמן המדידה מאפשרת בקרה מהירה בתנאי שדה ואפשרות למדוד מספר רב של ערוצי נחל בזמן קצר יחסית. תכונותיו המיוחדות מקנות למכשיר יכולת למדוד תהליכי זרימה מהירים ומאפשרת קבלת מידע מקיף בכל חתך הזרימה. עקב זמן המדידה הקצר ישנה אפשרות למדוד זרימות שיטפוניות שאין עליהן מידע רב. מדידת הממוצע המשוקלל בכל תא הינה יתרון על פני מדי זרם קונבנציונליים, המודדים מהירות זרימה במיקום ספציפי.

כמו לכל מכשיר, יש לו מגבלות וחסרונות, אשר חשוב להכירם. אחד החסרונות הוא מורכבות הפעלת המכשיר, ואמנם כיום יש מכשירים בפיתוח, אשר הפעלתם פשוטה למדי. מטרת דו"ח זה הינה לסקור בתמציתיות את עקרונות השיטה והעבודה, מגבלות, אופן העבודה ושימושים נוספים של מכשיר ADCP בהדגמה על StreamPro ADCP מתוצרת Teledyne RD Instruments. בחלק האחרון של הדו"ח מוצגות תוצאות מדידה בה ניתן לראות השוואה בין StreamPro ADCP למד זרם מדחף (propeller) ומד זרם אלקטרומגנטי. תקוותינו היא שהידע והמידע המובאים כאן בשפה העברית ישמשו את אנשי המקצוע שעוסקים בניטור ומדידות בנחלים בארץ, כגון: חוקרים וסטודנטים באקדמיה, רשויות ניקוז, רשות מים, רשות טבע וגנים, קרן קימת לישראל ומהנדסי ניקוז.

2. עקרונות השיטה

מכשיר ADCP מתבסס על אפקט דופלר למדידת מהירות זרימה. אחד התוצרים הינו חתך הזרימה מחולק לאנכים (ensembles) וכל אנך מחולק לתאים (cells, bins). בכל תא מחושבת מהירות הזרימה הממוצעת בווקטור שבכיוון הזרימה (איור 1). חישוב הספיקה הכוללת מתבצע ע"י הכפלת מהירות הזרימה הממוצעת בשטח החתך. בשל מגבלות המכשיר, באזורים בהם יכולות המכשיר אינן מאפשרות מדידת מהירות זרימה ולא שטח חתך, ההערכה מתבססת על אקסטרפולציה.



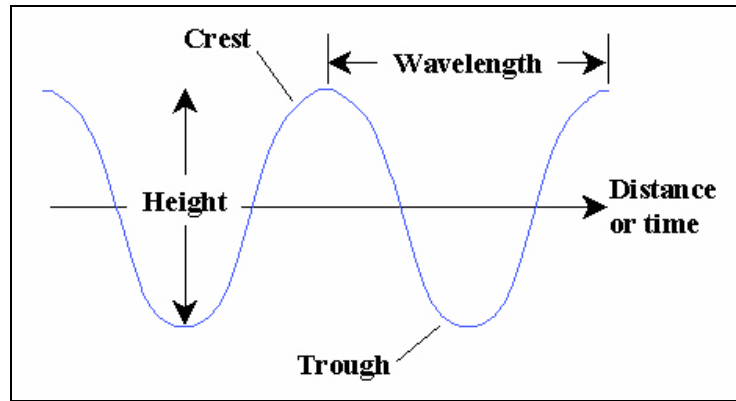
איור 1: דוגמה למדידה במכשיר ADCP מסוג StreamPro בתוכנת WinRiver. ציר x מייצג מספר אנך (ensemble), ציר y עומק מפני המים (מטר) והצבעים מייצגים מהירות זרימה בסדר עולה (0.02-1 מטר\שניה): רוד, סגול, כחול, תכלת, ירוק, צהוב ואדום. בחלק עליון ותחתון ישנם אזורים לבנים בהם לא ניתן למדוד. מקור: מדידה בנחל Wartach, גרמניה, 23.12.2010.

קול

קול נוצר כתוצאה מרטט של עור התוף באוזנו ע"י גלי לחץ. האנרגיה המכנית מתורגמת לאות חשמלי שהמוח מתרגם כקול. גלי קול יכולים להתרחש בגז, בנוזל או במוצק.

מאפייני גלים

- אבוס\ תעלה (troughs): לחץ נמוך
 - שיא\ פסגה (crest): לחץ גבוה
 - אורך גל (λ) (wave length): מרחק בין שיאים או אבוסים
 - תדירות (f) (frequency): מספר שיאים בזמן נתון
- (ראה איור 2)



איור 2: מאפייני גלים.

צליל גבוה מקורו בתדירות גבוהה. התדירות מבוטאת לרוב ביחידות הרץ (Hz) שהינה מספר פעמים בשניה. האוזן האנושית מסוגלת לשמוע תדירויות בתווח של כ- 40 הרץ עד 24 קילו הרץ (sonic). התדירויות האולטראסוניות בהן עובד מכשיר ADCP הינן גבוהות יותר.

מהירות הקול (c) (sound of speed) הינה מהירות ההתפשטות של גלי קול. להלן משוואה 1 בה מתוארת מהירות הקול כתלות בתדירות ובאורך גל (TRDI, 2006, pp. 4). יש לציין כי מהירות הקול בנוזל מושפעת ממליחות, מטמפרטורה ומלחץ.

$$c = f\lambda \quad (1)$$

אפקט דופלר

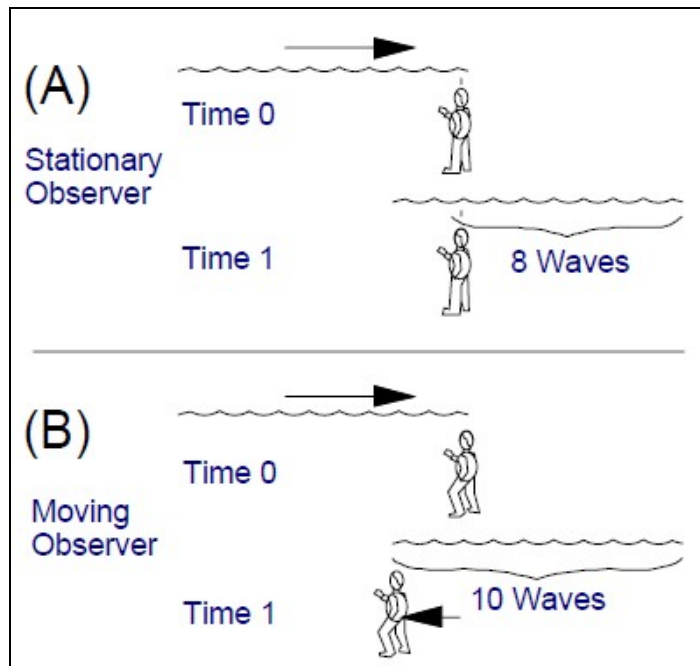
אפקט דופלר (Doppler effect) נוצר כתוצאה משינוי בתדירות הנצפית של גל כתוצאה מתנועה יחסית בין מקור הגל לצופה (איור 3). שינוי זה הינו הסט דופלר (Doppler shift). גובה הצליל (sound pitch) שהצופה שומע משתנה. לדוגמה, לרכבת צליל גבוה יותר כאשר היא מתקרבת ונמוך יותר כאשר היא מתרחקת. ניתן לתאר את התדירות לאחר הסט דופלר לפי (TRDI, 2006, pp. 5),

$$f_d = f_s(v/c) \quad (2)$$

כאשר: f_d הינה תדירות האות לאחר הסט דופלר, f_s תדירות האות המקורי, v מהירות תנועה יחסית בין מקור האות לבין מקבל האות (התקרבות הינה בסימן חיובי והתרחקות בסימן שלילי) ו- c מהירות הקול.

ניתן להסיק מהמשוואה כי:

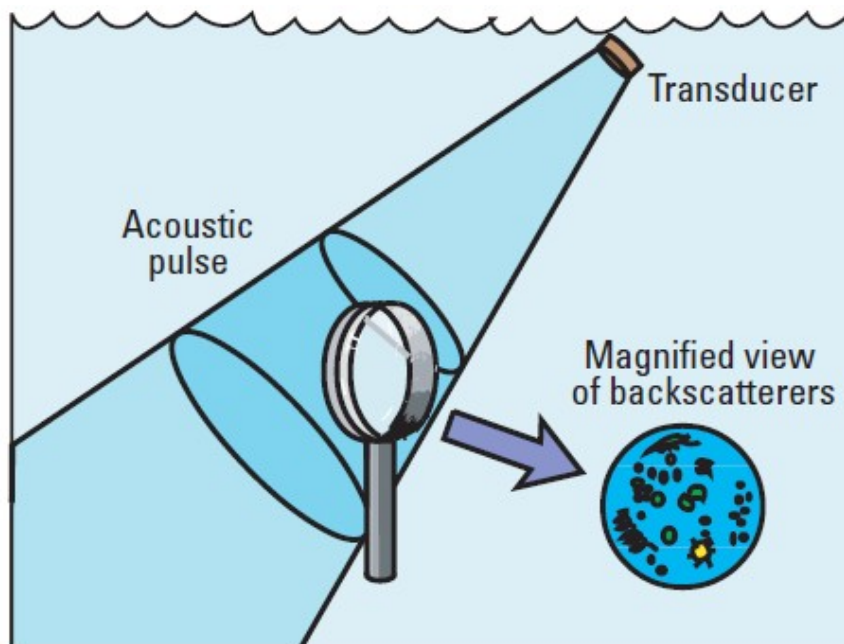
- אם התנועה היחסית מהירה יותר, התדירות לאחר הסט דופלר מהירה יותר;
- בהתרחקות ממקור האות, התדירות לאחר הסט דופלר איטית יותר;
- אם תדירות האות המקורי מהירה, גם התדירות לאחר הסט דופלר מהירה;
- אם מהירות הקול מהירה יותר, התדירות לאחר הסט דופלר איטית יותר.



איור 3: הסט דופלר. הצופה במצב A, ללא תנועה, חש בתדירות של 8 אורכי גל בזמן נתון לעומת הצופה במצב B, שנמצא בתנועה יחסית וחש בתדירות של 10 אורכי גל באותו פרק זמן (מתוך: 8, TRDI, 2006).

שימוש בהחזר גלי הקול

בכדי למדוד מהירות, משודרים גלי קול בתדירות קבועה ממכשיר ADCP ולאחר מכן נקלט ההחזר (echo) מחלקיקים מרחפים (איור 4) (TRDI, 2006).



איור 4: קרן של גלי קול המשודרת ממכשיר ADCP וחלקיקים מרחפים שגורמים להחזר גלי הקול (מתוך: 4, Simpson, 2001).

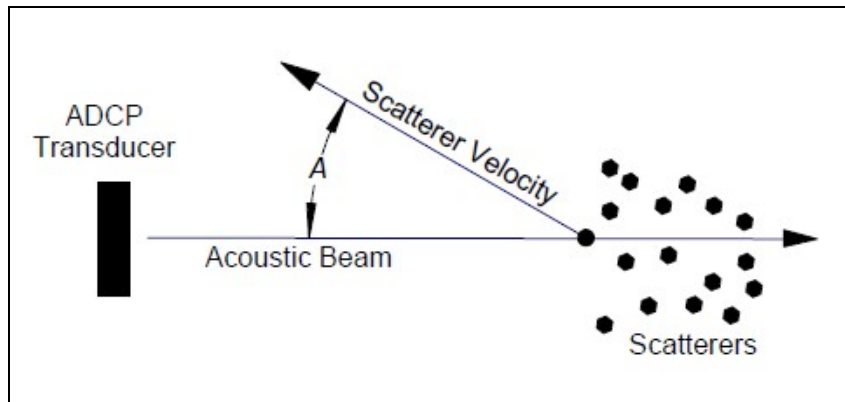
ההנחה היא שהחלקיקים נעים בממוצע במהירות זהה לזו של הזורם. יש לציין שרק חלק מהחזר מגיע לקולטן כתוצאה מבליעה, פיזור והתרחבות האות. מכיון שהמשדר והקולטן נמצאים במיקום זהה, הסט דופלר ראשון מתרחש בדרך אל החלקיקים והסט דופלר שני מתרחש בדרך חזרה לקולטן (כאילו החלקיקים הם מקור האות). לכן משוואה (2) מוכפלת ב- 2 ומתקבלת המשוואה הבאה (TRDI, 2006, pp. 7):

$$f_d = 2f_s(v/c) \quad (3)$$

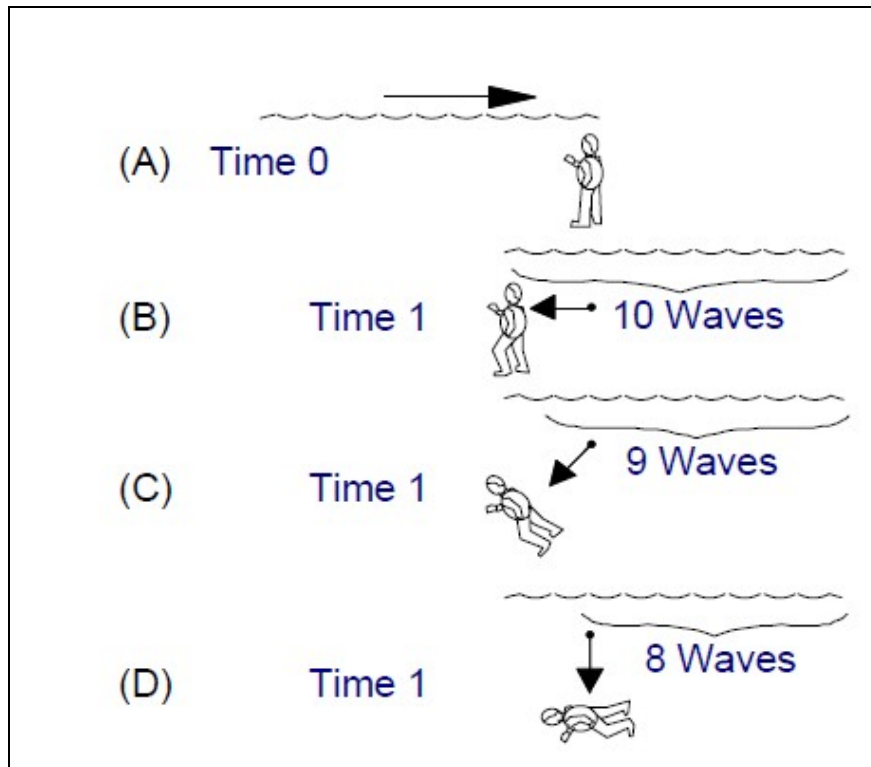
מכיון שהמשדר והקולטן הם באותו מיקום ותנועת החלקיקים העיקרית היא בזווית כלשהי למכשיר, מתקבלת המשוואה הבאה (TRDI, 2006, pp. 8),

$$f_d = 2f_s(v/c) \cos A \quad (4)$$

כאשר A הינה הזווית בין ווקטור המהירות היחסית ובין הקו שבין ה- ADCP והחלקיקים. הזווית משפיעה על עוצמת אפקט דופלר מכיון שזה מושפע רק מרכיבי המהירות שבכוון הקו שבין מקור האות לקולטן (איורים 5,6).



איור 5: זווית A בין ווקטור התנועה העיקרי של החלקיקים ובין הקו שבין ADCP והחלקיקים (TRDI, 2006, pp. 8).

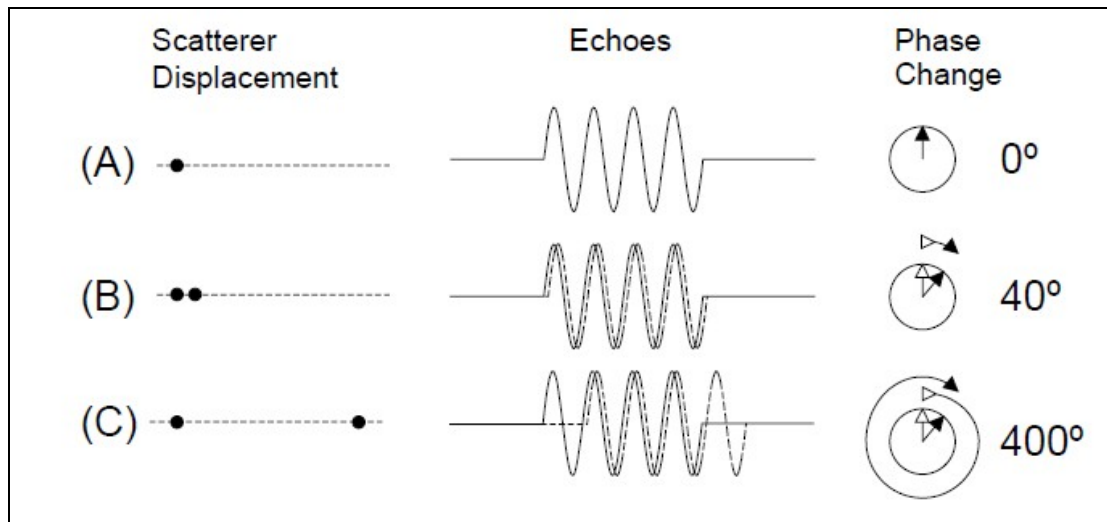


איור 6: השפעת זוויות תנועה על עוצמת אפקט דופלר. ב- A מצב לפני הגעת האות; הצופה ב- B נע ישירות לכיוון הקולטן ולכן אפקט דופלר הינו החזק ביותר; הצופה ב- C נע בזווית 45° לקולטן ולכן אפקט דופלר הינו בינוני; הצופה ב- D נע ב- 90° לקולטן ולכן אין אפקט דופלר (מתוך: TRDI, 2006, pp. 8).

מדידת מהירות זרימה

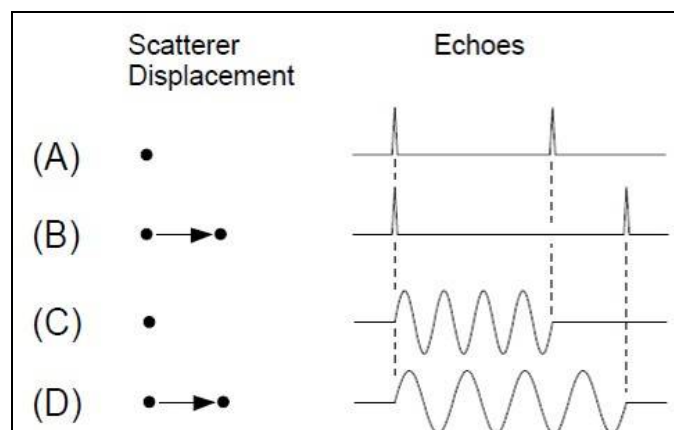
תדירות ההחזר מחלקיק ללא תנועה יחסית זהה לתדירות האות המשודרת מהמכשיר, אך ישנו הפרש זמן בין תחילת שידור האות לבין קבלת האות החוזר. הפרש הזמן גורם להפרש במופע (הפרש פאזה) והוא תלוי באופן ישר במרחק בין המכשיר לחלקיק (איור 7) ובמהירות הקול. אם ידוע פרק הזמן בין שידור האות לבין קליטתו, ניתן לחשב את מרחק החלקיק במידה ומהירות הקול ידועה. כאשר משודרים שני אותות אחד אחרי השני בהפרש זמן ידוע, ניתן לחשב את מרחק החלקיק בעת שידור האות הראשון והשני וכך לחשב את המרחק אותו נע החלקיק בפרק הזמן הזה, כלומר את מהירות התנועה של החלקיק.

שידור אות בפעימות (pulses) ובהפרש זמן ידוע בהשוואה לפעימות האות החוזר הינה דרך אחת למדוד את השינוי במיקום החלקיק בצורה נוחה ומדויקת יחסית וזו השיטה בה נמדד הסט דופלר במכשיר ADCP מסוג פס רחב של TRDI (כגון StreamPro). השינוי בהפרש המופע בין אותות משודרים בפעימות לבין הפרש המופע של האותות החוזרים בהתאמה הינו יחסי לשינוי במיקום החלקיק (בהנחה שהמשדר והקולטן נייחים) ושקול להסט דופלר (TRDI, 2006).



איור 7: הפרש מופע (פאזה) בהחזר מעצם ללא תנועה (תדירות ההחזר זהה). המרחק במצב A הינו 0 ולכן הפרש המופע הינו 0. המרחק גדל במצב B ולאחר מכן במצב C ולפיכך גם הפרש המופע. מצב C נראה כמו מצב B, אך בהפרש מחזור מלא (מתוך: 9, pp. TRDI, 2006).

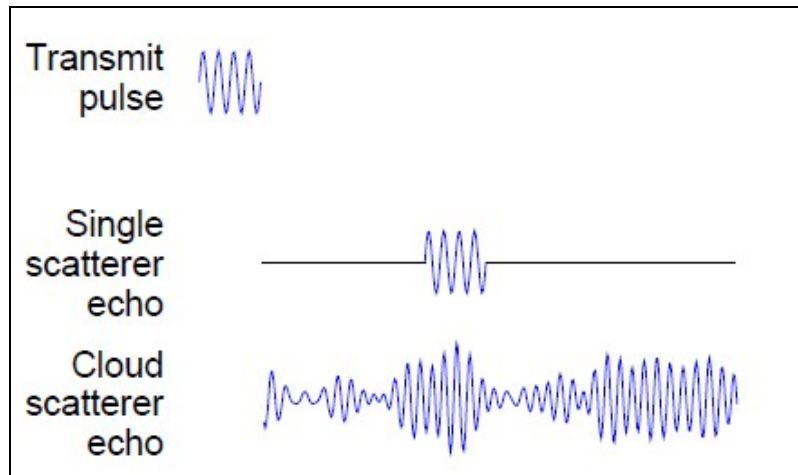
באיור 8 ניתן לראות חלקיק ללא תנועה בהשוואה לחלקיק בתנועה, כאשר משודר גל מדגם סינוס. הפרש מופע: הפרש זמן בין פעימות של האות החוזר גדול יותר לחלקיק שנמצא בתנועה ביחס לחלקיק ניח. מכיון שהחלקיק מתרחק באופן יחסי, הפרש הזמן בין הפעימות גדל. תדירות לאחר הסט דופלר: אורך גל חוזר מדגם סינוס גדול יותר לחלקיק שנמצא בתנועה ביחס לחלקיק ניח, כלומר תדירות הגל משתנה (ראה משוואה 1). מכיון שהחלקיק מתרחק באופן יחסי, תדירות הגל איטית יותר.



איור 8: חלקיק ללא תנועה בהשוואה לחלקיק בתנועה. השינוי בזמן בין פעימות שקול לאפקט דופלר: במצבים A ו-C החלקיק ניח ובמצבים B ו-D החלקיק בתנועה יחסית (מתוך: 10, pp. TRDI, 2006).

הבעיות במדידת הפרש מופע מתעוררת כאשר עובר מחזור מלא (איור 7). לצורך כך משתמשים בטכניקות לעיבוד אותות בכדי לזהות כמה מחזורים עברו. ניתן, לדוגמה, לשדר פעימות במרווחי זמן מעט שונים וכך להעריך את מספר המחזורים שעברו (TRDI, 2006).

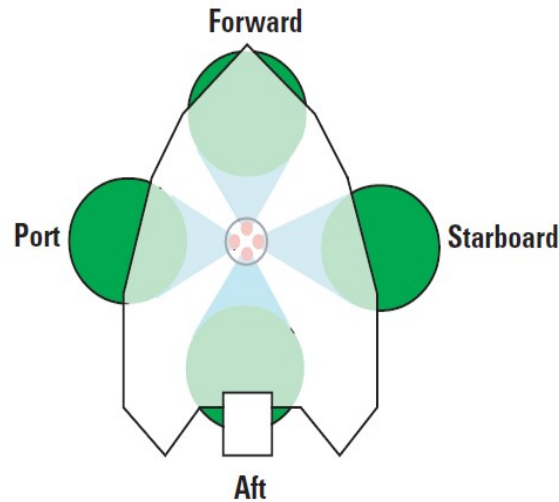
ההחזרים בפועל אינם החזרים מחלקיק בודד ומורכבים מהחזרים מענן של חלקיקים ולפיכך מורכבים (איור 9). פתרון אחד הינו לשדר פעימות בקצב מהיר מאוד, כך שהחלקיקים נעים מעט מאוד יחסית. כתוצאה מכך הפרש המופע לא משתנה הרבה ומתקבלת תמונה דומה אשר ניתן לנתחה (TRDI, 2006).



איור 9: פעימה משודרת והחזר מורכב (מתוך: TRDI, 2006, pp. 11).

מדידת שלושת רכיבי מהירות הזרימה

במכשיר StreamPro ישנם ארבעה מקורות לאותות היוצרים ארבע קרני קול. על סמך ההחזר מכל קרן בנפרד נמדדת מהירות הזרימה. לכל קרן זווית שונה (איור 10) המאפשרת מדידת מהירות זרימה ברכיב מסוים. יש לצין שמהירות הזרימה הנמדדת על סמך ההחזר מהקרניים השונות הינה במיקום שונה ובעזרת תיקון טריגונומטרי מחושבת מהירות הזרימה במיקום מאונך למכשיר. לפיכך, יש להסתמך על ההנחה כי ישנה הומוגניות אופקית בזרימה בין מיקומי המדידה. בכדי למדוד את שלושת רכיבי המהירות (x, y, z) יש צורך במינימום שלוש קרניים. מזוג אחד מחושב רכיב זרימה אופקי אחד (נניח רכיב x) וגם רכיב זרימה אנכי (z) . מזוג שני מחושב רכיב זרימה אופקי שני (רכיב y) וגם רכיב זרימה אנכי (z) . החישוב לשגיאה במהירות הזרימה יכול להיות מוערך על סמך ההבדל בין המהירויות האנכיות שנמדדו פעמיים. הקרן הרביעית מאפשרת הערכה לאמינות ההנחה להומוגניות אופקית ע"י חישוב רכיבי מהירות הזרימה במערכי קרניים שונים. קונפיגורציית Jenus ל-4 קרניים שמוצגת באיור 10 מאפשרת להקטין את הטעויות כתוצאה מנטיית המכשיר על פני המים (pitch and roll), כיון שאלה משפיעות באופן דומה על זוגות קרניים מנוגדות (Simpson, 2001; TRDI, 2006).



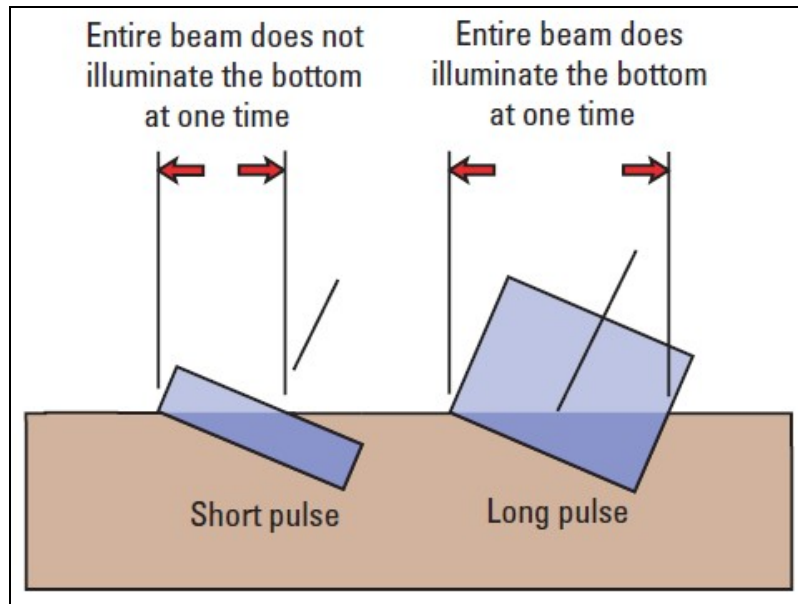
איור 10: ארבע קרניים במכשיר ADCP של TRDI (מתוך: Simpson, 2001, pp. 6).

חלוקה לתאים

המרחק אליו חודרות הקרניים תלוי בזמן. בצורה זו ניתן להפריד עומקים שונים בפרופיל. בכל תא מחושב הממוצע המשוקלל של רכיבי המהירות הנמדדים בתא ומתוך כך ניתן לחשב את מהירות הזרימה בווקטור הרצוי (Simpson, 2001). התאים מפוזרים באופן אחיד לכל אורך פרופיל העומק.

איתור קרקעית

בכדי לתקן את מדידות מהירות הזרימה שנמדדות יחסית לתנועת המכשיר ולקבל את מהירות הזורם יחסית לקרקעית, יש צורך במדידת מהירות מכשיר ADCP יחסית לקרקעית (bottom tracking). המדידה מתבצעת בשידור פעימה (pulse) ארוכה יותר, כאשר ההנחה הינה שעוצמת ההחזר מהקרקעית גדולה בסדרי גודל מאשר עוצמת ההחזר מחלקיקים מרחפים במים (איור 11). איתור הקרקעית מאפשר גם להעריך את עומק החתך. שידור פעימה ארוכה במכשיר StreamPro מתבצע בכל הקרניים ומכולן מחושב עומק הקרקעית בממוצע (Simpson, 2001). אם התשתית נעה (תנועת גרופת) יתכנו אי דיוקים משמעותיים אשר יש דרכים לתקנם. חשוב לבצע בדיקה כזו לפני המדידה (ראה פרק 5.2.3). אחת הדרכים להתגבר על תנועת התשתית הינה לשלב מצפן או GPS דיפרנציאל (DGPS) בכדי להעריך את מיקום המכשיר במרחב.



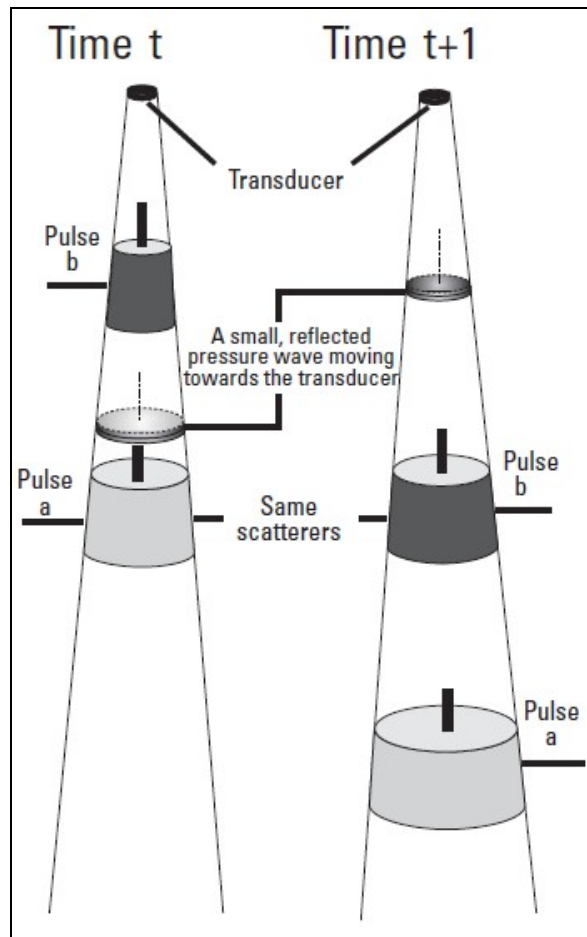
איור 11: פעימה ארוכה המשודרת לאיתור הקרקעית (מתוך: 9, pp. Simpson, 2001).

נטיות מכשיר על פני המים

למכשירי ADCP חיישנים המסוגלים למדוד את נטיות המכשיר על פני המים קדימה, אחורה ולצדדים (pitch and roll) בכדי לאפשר תיקון של מיקום המדידה ומהירות הזרימה. אופן חישוב מהירות הזרימה בעזרת קרניים מנוגדות מפחית אף הוא את השפעת נטיות המכשיר (Simpson, 2001). חשוב שהחיישן לא יצא מעל פני המים בזמן התנדדות המכשיר.

פס רחב ופס צר

במכשיר בעל פס צר (narrow band) נשלחת פעימה אחת (ping) לקרן אחת למדידה אחת. מדידת המהירות מתבצעת ע"י ניתוח אופי ההחזר והתדירות. במכשיר בעל פס רחב (broad band) משודרות שתי פעימות ולאחר מכן נמדד הפרש הזמן בין שתי הפעימות. החיסרון בפס צר הינו שמבחינה טכנית, הדיוק נמוך יחסית בגלל שיטות המדידה וישנו רעש גבוה יותר. היתרון בפס רחב הינו שדיוק המדידה גדל בגלל סיבות טכניות, אך עיבוד הנתונים מורכב יותר ולכן קצב הפעימות נמוך משמעותית. כמו כן ישנם חסרונות נוספים שמפורטים להלן: (1) כאשר הזמן בין הפעימות ארוך מדי, יכולים לחדור חלקיקים שונים או שתנועות אקראיות של חלקיקים קיימים יפריעו לדיוק המדידה ולכן יש צורך בהפרש זמנים קצר יחסית; (2) לא ניתן למדוד מהירויות נמוכות מ- 5 ס"מ לשנייה; (3) ישנו רעש עצמי הנוצר כתוצאה ממעבר שתי פעימות אחת על גבי השנייה (איור 12). הקטנת הטעות מרעש עצמי הינה ע"י שידור מספיק פעימות וניתוח שלהן באמצעים טכניים של עיבוד אותות (signal processing). כאשר המהירות המוחזרת גבוהה מספיק, כך שהתנועה בין פעימות גדולה ממחצית התדירות המשודרת, יכולה להיווצר טעות נוספת שנובעת מאי הבחנה בהפרש הפאזות (ambiguity error או velocity ambiguity). גם טעות זו מוקטנת ע"י שימוש בעיבוד אותות וקידוד הפאזות (Simpson, 2001).



איור 12: רעש עצמי (גל קול משני) הנוצר כתוצאה ממעבר שתי פעימות אחת על גבי השניה במכשיר מדגם פס רחב (מתוך: Simpson, 2001, pp. 19).

3. מאפייני ההחזר

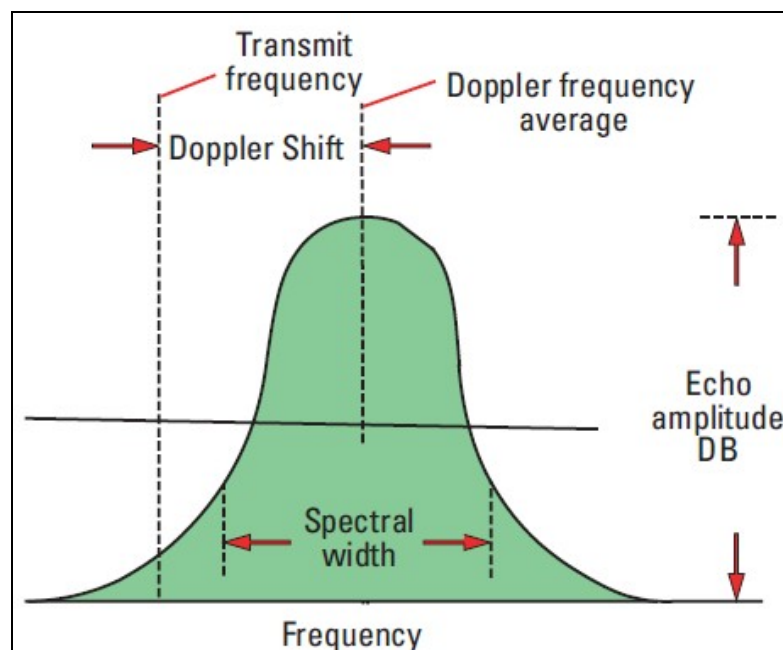
במכשיר ADCP משודר אות ולאחר זמן מסוים נקלט האות החוזר (echo). מניתוח האות החוזר מחושבת מהירות תנועת החלקיקים בזורם. האות החוזר חלש יותר בגלל בליעה, פיזור האות והתרחבות הקרן. בליעה של האות הינה כתוצאה ממעבר אנרגיית גל אקוסטי לאנרגיית חום (Brekhovskikh and Lysanov, 2003). בתדירות גבוהה יותר, הבליעה והפיזור משמעותיים יותר מכיון שהאות מושפע באופן ניכר מנוכחות החלקיקים. בליעה ופיזור תלויים גם בתכונות הזורם כגון טמפרטורה, מליחות ולחץ (Brekhovskikh and Lysanov, 2003). לדוגמה, במליחות גבוהה הבליעה והפיזור משמעותיים יותר (Simpson, 2001).

משרעת

המשרעת (amplitude) של ההחזר (איור 13) מבטאת את האנרגיה שלו וקטנה באופן לוגריתמי כתלות במרחק. המשרעת מושפעת בעיקר מתדירות האות, אך גם מרוחב ספקטרלי, משך הפעימה, תכונות הבליעה של המים ואיכות ההחזרה מחלקיקים. כאשר המשרעת גבוהה יותר, יחס אות לרעש (signal-to-noise ratio) גדול יותר ואי הדיוק קטן. כאשר יש מיעוט חלקיקים בזורם באופן יחסי, יחס אות לרעש קטן בגלל החזר לקוי, אך גם כאשר יש הרבה חלקיקים באופן יחסי בגלל בליעה, פיזור האות והיחלשותו (Simpson, 2001).

רוחב ספקטרלי

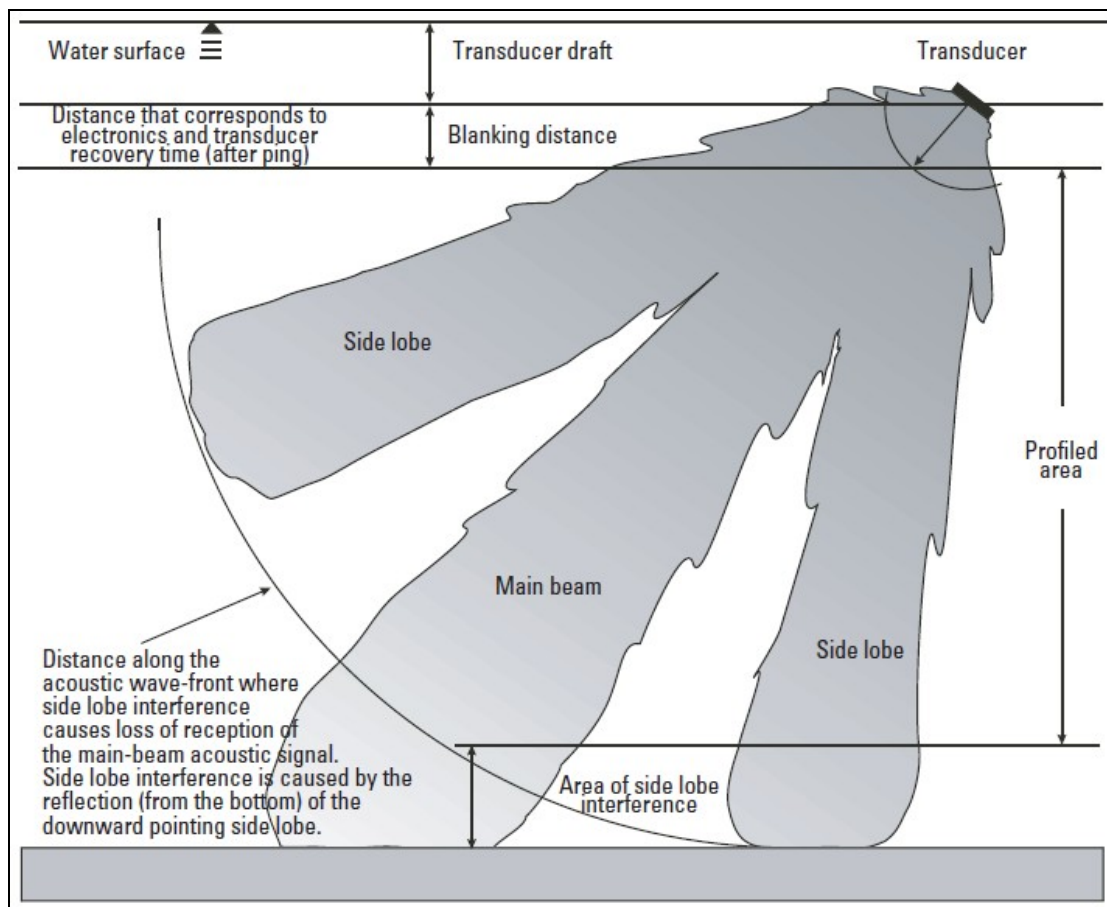
הרוחב הספקטרלי (spectral width) החוזר (איור 13) גדול מהרוחב הספקטרלי המשודר כתוצאה מתכונות שונות של החלקיקים (כגון גודל ואופי פני שטח) שמשפיעות על החזר האות. הרוחב הספקטרלי הינו מדד לאי דיוק המדידה (Simpson, 2001).



איור 13: מאפייני התדירות של האות החוזר. ניתן לראות את התדירות הממוצעת של האות החוזר ואת הסט דופלר (Doppler shift) יחסית לאות ששודר, משרעת (amplitude) ורוחב ספקטרלי (spectral width) (מתוך: Simpson, 2001, pp. 10).

קרניים משניות

בשל מגבלות טכניות, לקרן הראשית ישנן קרניים משניות (side lobe) אשר עלולות לגרום להפרעות (איור 14). מכיון שקרניים אלה פוגעות בקרקעית לפני הקרן הראשית, הן גורמות לכך שלא ניתן למדוד איזור בסמוך לקרקעית. החזר ראשון של קרניים משניות יכול להיות מהקרקעית והחזר נוסף יכול להיות מפני המים. כתוצאה מכך, ישנו איזור סמוך לקרקעית שלא ניתן למדידה. הקטנת זווית החיפוש ביחס לאנך מהאופק מקטינה את השטח המת, אך בד בבד מקטינה את הדיוק במדידה בשל הקטנת המימד האופקי של הקרן. השטח שלא נמדד סמוך לקרקעית נע בין 6% (20°) ל-15% (30°) מהעומק (Simpson, 2001).



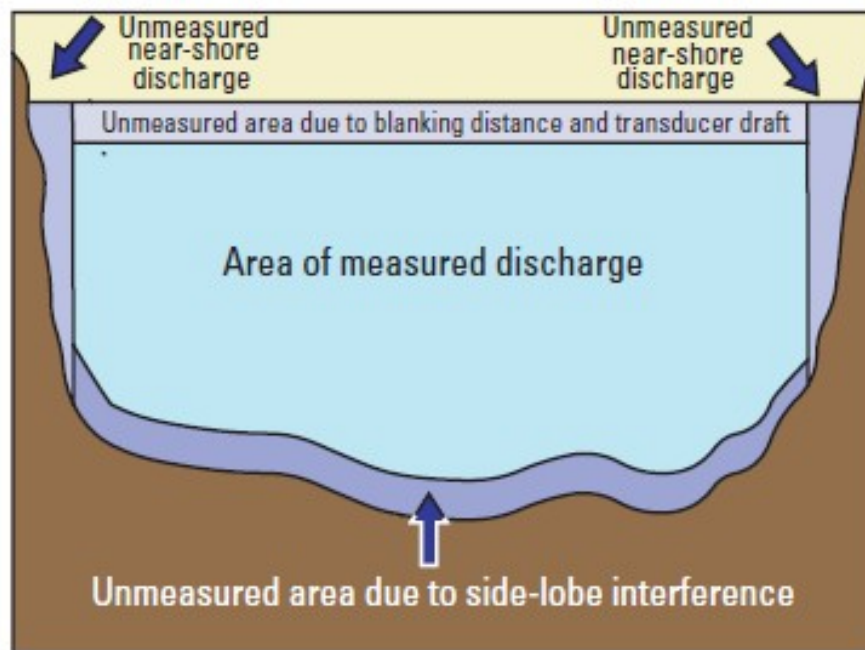
איור 14: קרניים משניות ואזורים ללא מדידה: (1) בחלק עליון החיפוש טבול במים (transducer draft), (2) מתחתיו מינימום מרחק (blanking distance) לקליטת ההחזר (3) ובתחתית אזור המופרע מקרניים משניות (side lobe) (מתוך: Simpson, 2001, pp. 11).

מרחק מינימלי לקליטת ההחזר

החיפוש משדר אות ואח"כ קולט את ההחזר. ישנו מינימום זמן הכרחי בו החיפוש לא יכול לקלוט החזרים לאחר סיום שידור האות מכיון שהחלק הרוטט ששידר את האות חייב להפסיק לרטוט לפני קבלת ההחזרים. כתוצאה מכך, החלק העליון של פרופיל הזרימה אינו יכול להימדד (איור 41). מרחק זה (blanking distance) נע בטווח 0.05 ל-0.3 מ' מפני המים והוא תלוי במאפייני חיפוש, מהירות הקול, אופן הפעלה, מימדי קרן, תדירות שידור אות וזווית חיפוש (Simpson, 2001).

4. אקסטרפולציות לאזורים בהם אין מדידות בפועל

האזורים בהם אין מדידות בפועל הם: (1) סמוך לפני המים כתוצאה מהעומק בו החיישן טבול במים ובגלל המרחק המינימלי לקליטת ההחזר (blanking distance), (2) בסמוך לקרקעית בגלל קרניים משניות (3) וסמוך לגדות בגלל המגבלות לעיל (איורים 1 ו-15). באזורים אלה המהירות מוערכת ע"י אקסטרפולציות מסוגים שונים שמתוארות להלן. חשוב לוודא שהערכות אלה אינן עולות על 40% מכלל הספיקה.



איור 15: אזורים בהם אין מדידות בפועל ויש צורך בהערכות בהסתמך על המדידות (מתוך: Simpson, 2001, pp. 31).

הערכת פרופיל מהירות הזרימה בחתך אנכי

ניתן להניח שמהירות הזורם בסמוך לקרקעית הינה אפסית ובסמוך לפני השטח המהירות היא קרובה למהירות מקסימאלית (בפרופיל זרימה קלאסי ללא תנועה של התשתית). העומק הכולל ידוע ממדידת המכשיר. השיטה שנמצאה מתאימה ביותר לתיאור פרופיל מהירות הזרימה בחתך אנכי הינה שיטת החזקה (משוואה 5 ואיור 16).

$$\frac{u}{u_{\max}} = \left(\frac{y}{h} \right)^{1/6} \quad (5)$$

כאשר: u הינה המהירות במרחק y מהתשתית, $u_{\max}$ מהירות מקסימאלית סמוך לפני המים ו- h עומק הזרימה (מתוך: Cheng, 2007).

ניתן לשנות את המקדם בטווח שבין 1/2 ל- 1/10 בכדי להתאימו לפרופילים הידראוליים לא סטנדרטיים כגון בנחלים רדודים, בעלי תשתית לא אחידה או חספוס גבוה (למשל צמחיית גדות) ובאזור שפך הנחל. התאמת המקדם הינה כתלות בתוצאות המדידות (Chen, 1991; Simpson and)

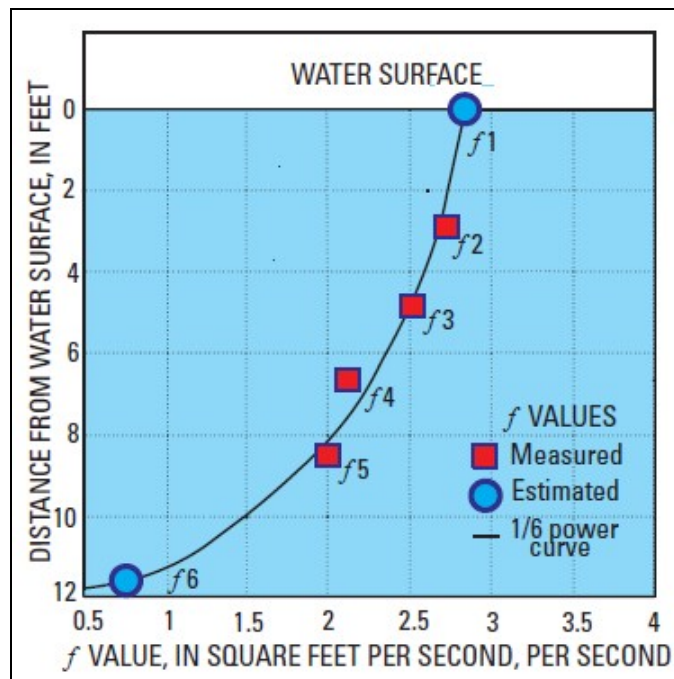
(Oltman, 1993; Simpson, 2001; Cheng, 2007). במידה ויש זרימה לשני כיוונים (bidirectional flow), כלומר כאשר המים בחלק העליון של הזרם נעים לכיוון אחד ובחלק תחתון לכיוון שני, יש צורך בשיטות אקסטרפולציה שונות.

הערכת מהירות ושטח בסמוך לגדות

השיטה בה המהירות מוערכת בסמוך לגדות הינה אמפירית בהתבסס על יחס אינטרפולציות כמודגם במשוואה הבאה (איור 17) (Simpson, 2001, pp. 31).

$$\frac{V_e}{\sqrt{d_e}} = \frac{V_m}{\sqrt{d_m}} \quad (6)$$

כאשר: e הינו מיקום בחצי המרחק בין הגדה לבין המיקום הנמדד הסמוך, V_e המהירות הממוצעת לאורך המוערכת במיקום e , V_m המהירות הממוצעת באורך הסמוך, d_e עומק חתך במיקום e ו- d_m העומק הנמדד בחתך הסמוך.

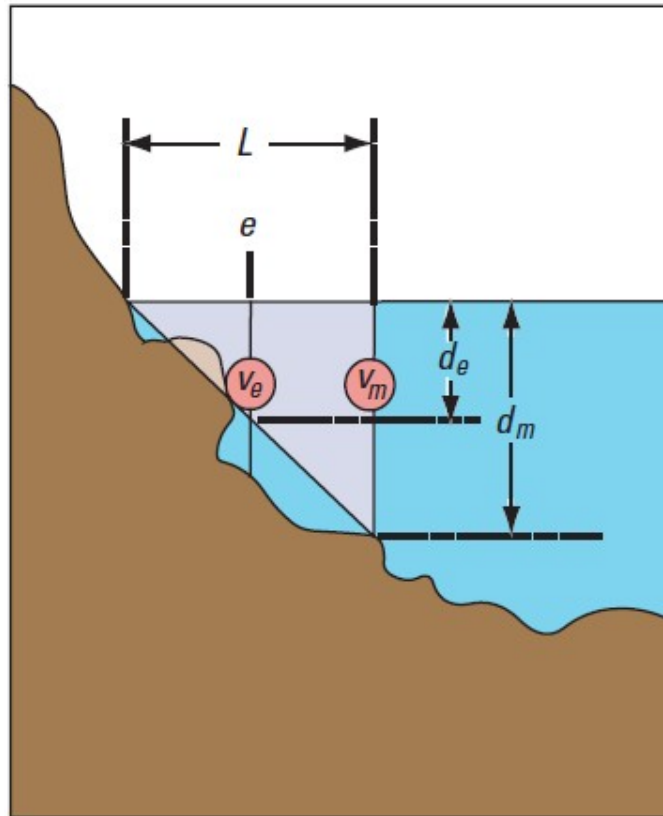


איור 16: אקסטרפולציה בשיטת שיטת החזקה (מתוך: Simpson, 2001).

בהנחה ופרופיל האפיק הינו משולש, משוואה 5 מצטמצמת למשוואה הבאה (Simpson, 2001, pp. 31):

$$V_e = 0.707V_m \quad (7)$$

אם פרופיל הגדה אינו קרוב לפרופיל משולש יש לתקן את ההערכות בסמוך לגדה.



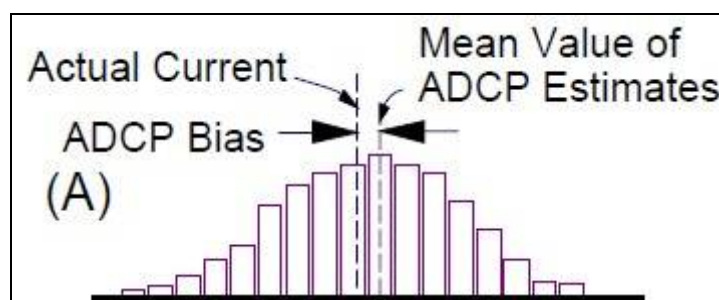
איור 17: הערכת מהירות זרימה ושטח חתך בסמוך לגדות (מתוך: Simpson, 2001, pp. 32).

5. אי דיוקים במדידה

ישנם שלושה סוגים של אי דיוקים במדידה: (1) כתוצאה מהפעלה לא נכונה של מכשיר המדידה (gross errors); (2) אי דיוקים בעלי תבנית מתמטית שחוזרת על עצמה (systematic) שיכולים להיגרם מאי קיומן של ההנחות ומשפיעים באופן ניכר על התוצאות; (3) אי דיוקים אקראיים (random uncertainty) הכוללים את מה שלא נכלל בסוגים הנ"ל. בפרק זה יוצגו שני הסוגים האחרונים.

5.1. אי דיוקים אקראיים

אי דיוקים אקראיים (random) ניתנים לצמצום ע"י ממוצע של כמות מספקת של נתונים שייצגו את האוכלוסייה (Simpson, 2001). ישנם אי דיוקים אקראיים כתוצאה ישירה מהשיטה בה עובד המכשיר ויש חשיבות גבוהה למיצוע כמות מספקת של נתונים. באיור 18 ניתן לראות את הנתונים שנאספו ואת צמצום הטעות האקראית לטעות קטנה יחסית. אם ישנם מספיק נתונים, סדר גודל של הטעות האקראית יהיה קטן יחסית. סדר הגודל של אי דיוקים אקראיים במדידה יחידה יכול להגיע עד 0.5 מ' לשניה (TRDI, 2006). ניתן להעריך את הטעות הכוללת בעזרת חישוב סטיית תקן. עיבוד הנתונים יכול להתבצע בזמן המדידה או לאחריה (post processing). טעות אקראית יכולה להיגרם כתוצאה מאי דיוקים פנימיים במכשיר (self noise) או אי דיוקים חיצוניים. אי דיוקים פנימיים מושפעים מהגדרות המדידה כגון תדירות, אורך פעימה, גודל תא, מספר תאים (cells) וגאומטריית הקרניים. אי דיוקים חיצוניים נובעים ממערבליות (turbulence), תנאי זרימה בלתי יציבים ותנועת המכשיר על פני המים. על מנת להגדיל כמות נתונים ולקבלת ממוצע מהימן יותר, ניתן לאגור נתונים במיקום מסוים (אנך) למשך זמן רב (3-15 דקות) או לעשות מספר חתכי רוחב ולחשב ממוצע שלהם (Gunawan et al., 2010). אפשרות זו בעיתית במידה וקיימים שינויים מהירים באופי הזרימה.



איור 18: צמצום הטעות האקראית ע"י מיצוע כמות גדולה של נתונים (מתוך: TRDI, 2006, pp. 20).

5.2. אי דיוקים בעלי תבנית מתמטית שחוזרת על עצמה

קיים קושי להעריך חלק מהגורמים לאי הדיוקים מסוג זה. להלן מוצגים מספר גורמים שחשוב להכירם.

5.2.1 גורמים המשפיעים על מהירות הקול

ישנם שלושה גורמים המשפיעים בקשר חיובי על מהירות הקול: טמפרטורה, מליחות ולחץ הידרוסטטי. במכשיר StreamPro קיים חיישן טמפרטורה שחש את הטמפרטורה סמוך לפני המים ובעזרתו מתוקנת מהירות הקול. ישנה אפשרות להזין למכשיר את המליחות. יש לשים לב לשינויים במהירות הקול לאורך הפרופיל האנכי. במידה ושינוי מהירות הקול ידוע, ניתן לתקן את הנתונים בהתאם.

ניתן למדוד ישירות את מהירות הקול ע"י מכשירים מיוחדים (velocimeters) או להעריך את מהירות הקול בעזרת משוואה 8 האמפירית (Brekhovskikh and Lysanov, 2003). מהירות הקול באוקיאנוס נעה בין 1450 ל-1540 מ' לשנייה (Brekhovskikh and Lysanov, 2003).

$$c = 1449.2 + 4.6T - 0.055T^2 + 0.00029T^3 + (1.34 - 0.01T)(S - 35) + 0.016z \quad (8)$$

כאשר: T הינה טמפרטורה במעלות צלסיוס, S מליחות ב ppt (‰) ו- z עומק במטרים.

המשוואה תקפה בטווחים הבאים: $0 \leq z \leq 1000\text{m}$; $0 \leq S \leq 45\text{‰}$; $0^\circ\text{C} \leq T \leq 35^\circ\text{C}$.

תיקונים למהירות הקול

במידה ויש שינויים במהירות הקול לאורך הפרופיל האנכי יש צורך לתקן את אורך התא ומיקומו בהתאם. בעזרת משוואה 9 ניתן לתקן את אורך התא ולאחר מכן לתקן את מיקום התאים. בעזרת משוואה 10 ניתן לתקן את מהירות הזרימה (TRDI, 2006, pp. 33-34).

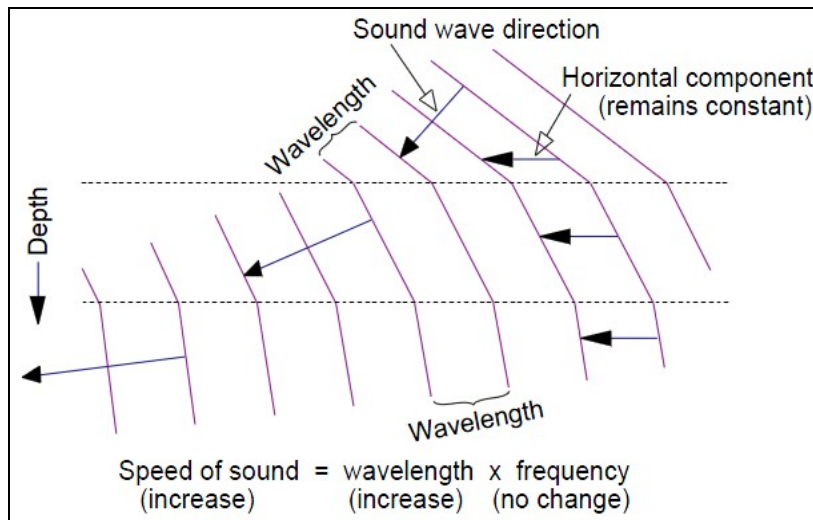
$$L_{corrected} = L_{uncorrected} (c_{ADCP} / c_{real}) \quad (9)$$

כאשר: L הינו אורך התא ו- c מהירות הקול.

$$V_{corrected} = V_{uncorrected} (c_{real} / c_{ADCP}) \quad (10)$$

כאשר: V הינה מהירות הזרימה.

במבט על רכיבי המהירות, הרכיב האנכי של המהירות תלוי בשינויים אנכיים במהירות הקול בפרופיל, אולם הרכיב האופקי של המהירות אינו משתנה, כיון שתדירות גל קול אינה משתנה ואורך הגל משתנה. כתוצאה משינויי אורך הגל, הרכיב האופקי נשאר קבוע (איור 19).



איור 19: השפעת שינויים במהירות הקול על פיזור קרני הקול. למרות שכיוון קרני הקול משתנה גם אורך הגל משתנה, הרכיב האופקי נשאר קבוע (מתוך: TRDI, 2006, pp. 41).

5.2.2. תנועת תשתית

מכיון שהמכשיר מודד את מהירותו ביחס לתשתית הערוץ, אם ישנה תנועה של התשתית (גרופת) יתכנו אי דיוקים משמעותיים אשר יש דרכים לתקנם וחשוב לבצע בדיקה כזו לפני המדידה. דרך אחת הינה שימוש ב GPS דיפרנציאלי, אך יתכן קושי בקליטת לוויינים בערוץ נחל. דרך שניה הינה לייצב את המכשיר במיקום מסוים במשך 5-10 דקות (כתלות ביציבות הסירה), לאגור את המהירות הממוצעת של התשתית וכך לתקן את מהירות הזורם הנמדדת. דרך שלישית להעריך את תנועת התשתית הינה ע"י ביצוע שני חתכי רוחב הלך וחזור (loop) באותו מסלול והשוואת המיקומים המתקבלים מהמכשיר בחתך אחד לעומת השני. אם ישנו שוני במיקום, סימן שיש תנועת תשתית ואפשר להעריכה בדרכים שונות (Mueller and Wagner, 2006; Mueller and Wagner, 2009).

כאשר יש תנועת גרופת, גם העומק הנמדד יכול להיות מוטא ורצוי לבצע מדידת עומק באופן שונה בכדי להעריך את הטעות.

5.2.3. ריכוז רחופת ובועות

ריכוז נמוך מדי של מרחפים ביחס לתדירות האות יגרום לכך שלא יהיה החזר מהאות המשודר. ריכוז רחופת גבוה ואו מערבוליות גבוהה ואו ריכוז גבוה של בועות אוויר עלולים להשפיע על יכולת האות לחדור מספיק עמוק בשל בליעת האות וגם יגדילו את הרעש הנמדד. העומק מוערך ע"י המכשיר במיקום בחתך בו יש עליה משמעותית בהחזר. אם אין עליה משמעותית בהחזר, העומק המוערך יכול להיות לא נכון. במקרה של ריכוז רחופת גבוה, ניתן להשתמש במכשיר בעל תדירות נמוכה יותר.

5.2.4. מרווח זמן בין פעימות

במידה והפעימות המשודרות מהמכשיר הינן במרווח קצר מידי יתכן ויהיה קשה להבחין בהפרש הפאזה ואילו אם הפעימות במרווח ארוך מידי, תהיה תנועת חלקיקים לכיוונים שונים בין שתי הפעימות ותגרם טעות. יש להתאים את המרווח בין הפעימות לתנאים בפועל (Simpson, 2001).

5.2.5. אקסטרפולציה

ישנן שיטות שונות לאקסטרפולציה לאזורים בהם אין מדידות (ראה פרק 4). חשוב להתאים את השיטה הנכונה למצב הקיים בשטח (Gunawan et al., 2010).

6. מגבלות

מגבלות המכשיר תלויות בדגם ובתכונות המכשיר אולם קיימות מגבלות שנובעות מצורת השימוש ב- ADCP ולכן דרושה מודעות אליהן:

- למיטב הידיעה בעת כתיבת הדו"ח, מכשירי ADCP מוגבלים למדידת מהירות של 10 מ' לשניה (Lu et al., 2006).
- יש לשים לב לנחלים צרים ו\או רדודים כתלות בגודלו של המכשיר ומאפיינים של האות המשודר. למכשיר ספציפי מרחק מינימאלי מהגדה ועומק מינימאלי בו הוא יכול למדוד. יש להתאים את המכשיר לתנאי המדידה. ישנם מכשירים שיכולים למדוד בעומק מינימלי של 15 ס"מ (StreamPro) ובנחלים צרים ברוחב 1 מ' (Q-Liner). כלומר, ניתן למדוד גם בערוצים קטנים יחסית (Gunawan et al., 2010), אך יש לודא שלפחות 60% מכלל הספיקה נמדדת, בכדי שהערכת הספיקה בהסתמך על האקסטרפולציות תהיה מהימנה (ראה פרקים 3, 4). בגלל מגבלות המדידה בנחלים צרים ורדודים ישנה העדפה למדידה בנחלים רחבים ועמוקים.
- מכשיר ADCP לא יעיל למדידת מהירות זרימה בסמוך לקרקעית בשל הפרעת הקרניים המשניות (ראה פרק 3).
- מליחות, טמפרטורה ולחץ משפיעים על מהירות הקול בתווך. באם ישנם זורמים בעלי מאפיינים שונים יש למדוד בנפרד את המליחות והטמפרטורה ולהעריך את הלחץ בכדי לתקן את מהירות הזרימה הנמדדת ע"י המכשיר (Johnson and Loving, 2002) (ראה פרק 5.2.1). ברוב הנחלים בישראל המליחות והטמפרטורה אחידה בגוף המים ושינויי הלחץ אינם משמעותיים. יש לשים לב לשככי הנחלים לים, בהם יכולה להיות חדירת מי ים במעלה הערוץ למרחק ניכר או לאזורים בהם יש חדירת שככים תעשייתיים בעלי מליחות או טמפרטורה שונה.
- צמחיה בערוץ כגון בנחלים בצפון הארץ, בנחל הירדן ובנחל הבשור משפיעה על פילוג המהירות ולכן יש לבדוק את התאמת שיטת האקסטרפולציה (ראה פרק 4). צמחיה גם מפריעה לקליטה ושידור האות ולכן לאיכות הנתונים (Gunawan et al., 2010). בשל הפרעות הצמחיה ניתן למדוד באנכים ספציפיים ולא בהסעה רציפה (ראה פרק 8).
- בנחלים לא גדולים עם שיפוע תלול (מעל 0.1 %) ובנחלים בעלי משטר שיטפוני יתכנו שינויים מהירים בגובה התשתית או במפלס המים כיון שהזרימה בלתי יציבה. שינויים מהירים במפלס המים, חדירת אוויר רב לשכבה עליונה ומערבולות גבוהה מפריעים למדידה בשל אי היכולת לבצע חזרות, אי יציבות המכשיר על פני המים וריכוז גבוה של מוצקים וגזים המשפיעים על היכולת של האות לחזור לעומק (ראה פרק 3). בתנאים כאלה ניתן להשתמש במשקולת (פצצה הידראולית) אליה מחובר החישן וללא סירה. באופן כזה קל יותר ליצב את החישן ללא חשש מהתהפכות הסירה. יש לציין כי במידה ולא ניתן למדוד את כל החתך, אנך אחד יכול לייצג במידה סבירה את הספיקה הכוללת (Lu et al., 2006).

בזמן שיטפון יש לקחת בחשבון שישנם עצמים שצפים על פני המים כגון עצים ופסולת שיכולים לסכן את המכשיר כתוצאה מפגיעה פיזית ונזק מכאני.

- חשוב להתאים את תדירות המכשיר לריכוז המרחפים. כמעט בכל הנחלים הטבעיים יש ריכוז גבוה מספיק של מוצקים המאפשר מדידה ב- ADCP. במקומות בהם יש הרבה סחיפה וריכוז הסחף הינו גבוה מאוד (כ- 50,000 מ"ג/ליטר, טווח: 2,000-270,000 מ"ג/ליטר), כגון בדרום ישראל (כהן, 2006; Alexandrov et al, 2009; בן-צבי א. וחובריו, 2010), יש לבדוק את מגבלות המכשיר לחדור לכל עומק חתך הזרימה. במידת הצורך יש להשתמש בתדירות נמוכה יותר. לדוגמה, במכשיר מסוג ADV (שמודד מהירות זרימה נקודתית בנפח מייצג בשיטה זהה על פי אפקט דופלר) בתדירות 3 מגה הרץ לא התאפשר למדוד בריכוז רחופת הגבוהה מ- 30,000 מ"ג/ליטר (Lu et al., 2006).
- מדידה כאשר יש תנועת גרופת כמפורט בפרק 5.2.2 בשל אי יכולת להעריך עומק זרימה ובשל השפעה על מהירויות הזרימה הנמדדות.

7. כיול

לא קימת כיום שיטה תקנית מקובלת לכיול המכשיר בגלל מורכבותו ובשל מגבלות השיטות המקובלות לכיול מדי זרימה נקודתיים כגון מידות המיזרם, כמות מספקת של חלקיקים מרחפים בזרם והשראה של שדות מגנטיים. בנוסף, ניתוח התוצאות ממכשיר ADCP מורכב מאוד (Oberg, 2002).

שיטת כיול אחת למהירות זרימה הינה ע"י השוואה למדי זרימה אחרים במיזרם או בתנאים טבעיים (ראה פרקים 10-11). יתרון במיזרם הוא שניתן לשלוט על הספיקה ומשתנים נוספים כגון ריכוז רחופת. החיסרון במיזרם הינו שיש השפעה של ההחזר מהגדות ומהקרקעית וקשה ליישם מדידה של ADCP בזרימה מהירה. השוואה למדי זרימה אחרים מורכבת וקשה לכייל את המכשיר על פיה, אלא להעריך דיוק כולל בלבד (Oberg, 2002).

שיטה שניה לכיול מהירות זרימה הינה להשתמש במיכל, כאשר מעליו נגרר המכשיר במהירות ידועה (tow tank). החיסרון הוא שהמים עומדים ואין בהם תנועה, כך שרחופת שוקעת ויש צורך בזריעת חלקיקים. זריעה כזו לרוב לא מתפזרת באופן אחיד. חסרונות נוספים הם השפעות קצה, חוסר בשכבת גזירה ונוכחות שדות מגנטיים (Oberg, 2002).

שיטה שלישית לכיול מהירות זרימה הינה לגרור את המכשיר במסלול ידוע באגם. ניתן לכייל באופן זה את מהירות תנועת ה- ADCP, מערך הקרניים ומהירות הזרימה בשכבה מסוימת בהשוואה למהירות הסירה. לא ניתן לבדוק את כל האספקטים שהמכשיר יכול למדוד (Oberg, 2002).

ניתן לכייל ADCP לספיקה כוללת בהשוואה לשיטות אחרות (מדחף, ADV ועוד) (ראה פרקים 10,11). בתנאים טבעיים נמצא כי ADCP הינו בטווח של עד 5% מהספיקה שנמדדה במכשירים אחרים (Gunawan et al., 2010; WMO, 2010, Oberg, 2002). החסרונות בהשוואה לשיטות אחרות הינם יכולות המכשירים האחרים למדוד במיקומים מסוימים בלבד והפרש הזמנים בין המדידות. השוואה כזו דורשת זמן עבודה רב ויקרה יחסית.

8. אופני עבודה

ניתן לעבוד עם מכשיר ה- StreamPro ADCP בשני אופנים למדידת ספיקה: (1) הסעה רציפה לאורך החתך (moving boat) (2) מדידה באנכים ספציפיים (section by section) ולאחר מכן חישוב ספיקה כוללת מאנכים אלו. לכל אופן פעולה תוכנה ספציפית לעיבוד הנתונים. מדידה באנכים ספציפיים יכולה להיות ישימה כאשר לא ניתן להסיע את המכשיר לכל אורך החתך בגלל מכשולים פיזיים או כאשר המכשיר לא מכיל תכונה לאיתור הקרקעית (bottom tracking). יש לשים לב שבמכשיר ללא מצפן או GPS ובהסעה רציפה לאורך החתך, פרופיל הקרקעית שמתקבל אינו זהה לפרופיל בפועל. הפרופיל המתקבל מורכב מהאנכים שנמדדו ומכיון שההסעה של המכשיר הינה בקצב שונה הפרופיל אינו בקנה מידה אחיד. לפיכך, במידה ומעוניינים בחתך מדויק יש למדוד באנכים בלבד. במכשירים הכוללים GPS או מצפן אין בעיה בהסעה רציפה לאורך החתך והפרופיל שמתקבל הינו בקנה מידה לפרופיל בפועל.

9. שימושים נוספים

9.1. הערכת מהירות תנועת גרופת

חלק ממכשירי ADCP מסוגלים לחוש את תנועתם ביחס לתשתית הנחל. ניתן להשתמש בתכונה זו בכדי להעריך את מהירות התנועה של גרופת באופן רציף במידה ומכשיר ה- ADCP יציב או שמיקומו ידוע. נמצא כי ישנה העדפה למקטע מסוים כגון: מכשיר בתדירות 1200 קילו הרץ רגיש לתנועת מקטע חולי ולא למקטע גדול מכך (Kostaschuk et al., 2010; Gaeuman and Pittman, 2005). יש לקחת בחשבון כי האות המשודר במכשיר ADCP חודר לעומק מסוים בלבד לתוך האזור בו יש תנועת גרופת כתלות בתדירות האות, עוצמת האות ותכונות הגרופת\ רחופת. עומק זה משתנה דינמית במהלך הזרימה (Kostaschuk et al., 2005). גודל הסדימנטים הנעים כגרופת או כרחופת יכול אף הוא להשתנות כתלות במאפייני הזרימה. במידה והמקטע החולי מרחף, יתכן שהמידות יתייחסו לרחופת ולא לגרופת (Kostaschuk et al., 2005).

9.2. הערכת ריכוז רחופת

עוצמת ההחזר תלויה במאפייני המכשיר (כגון: תדירות, עוצמת אור, רגישות קולטן ומרחק מנפח המדידה) ומאפייני המרחפים (גודל, סוג וריכוז הרחופת). לפיכך, על ידי כיוול ריכוז הרחופת לעוצמת ההחזר ניתן להשתמש במכשיר לקריאה רציפה של ריכוזי הרחופת בפרופיל הזרימה בהנחה שאין משתנים אחרים שמשפיעים על עוצמת ההחזר (Kostaschuk et al., 2005; Kim and Voulgaris, 2003; Holdway et al., 1999; Holsaway et al., 1998).

9.3. הערכת מערבליות

בכדי למדוד מהירות זרימה בוקטור רצוי, נמדדים שלושת רכיבי מהירות הזרימה במכשיר ADCP. במידה ותדירות המדידה מספיק גבוהה, ניתן להעריך מערבליות (Muste et al., 2004; Simpson et al., 2004).

10. השוואה בין שני מכשירי ADCP: StreamPro ו-QLiner, בתעלה מלאכותית

מספר חברות מייצרות מכשירי ADCP במגוון תדירויות. שתי חברות שמייצרות מכשירים בעלי יכולת לאיתור קרקעית הינן Teledyne RD Instruments ו-SonTek. עקרון הפעולה במכשירים אלה זהה, אך ישנן גישות שונות לעיבוד הנתונים בשל הרעש הגבוה הקיים במדידות המתבססות על הסט דופלר של גלי קול במים. הראשונה מתבססת על עיבוד אותות בפס רחב בעוד השנייה מתבססת על שידור מספר רב של אותות בקצב מהיר (ראה פרק 2).

יצרנית נוספת שפיתחה מכשיר ADCP ללא יכולת לאיתור קרקעית הינה OTT. להלן השוואה בין שני מכשירים: StreamPro ADCP (TRDI) ו-QLiner ADCP (Ott) בתעלה מלאכותית בצורת טרפז (Frizell and Vermeyen, 2007). המכשיר הראשון מצויד בארבע קרניים אקוסטיות שמוקנות בזווית 20° מהאנך לחתך הנמדד וביכולתו למדוד את מהירות הזרימה בשלושה רכיבים, כאשר איסוף הנתונים הינו בקצב של 40 הרץ. המכשיר השני מצויד בשלוש קרניים בלבד, בהן קרן למדידת עומק ומדידת המהירות הינה דו-ממדית, כאשר איסוף הנתונים מתבצע בקצב 3 הרץ. הבדל נוסף הינו היכולת של מכשיר ה-StreamPro לאתר את הקרקעית, מה שמאפשר הפעלה בהסעה רציפה לאורך החתך. במקביל למדידות שבוצעו עם שני המכשירים לעיל, בוצעה מדידה גם ע"י מד זרם מדחף (propeller). מהשוואת תוצאות המדידה של שני המכשירים למדידה במד זרם מדחף ולעקום רום ספיקה התקבלות התוצאות הבאות:

מדידה 1: הספיקה הכוללת במד זרם מדחף נמצאה גבוהה ב- 3.9% מהספיקה לפי עקום רום ספיקה. הספיקה הכוללת על סמך ממוצע שני חתכי רוחב באנכים ספציפיים במכשיר StreamPro הייתה נמוכה ב- 8.3% מהספיקה לפי עקום רום ספיקה ואילו במכשיר QLiner ב- 0.7% גבוהה מהספיקה לפי עקום רום ספיקה.

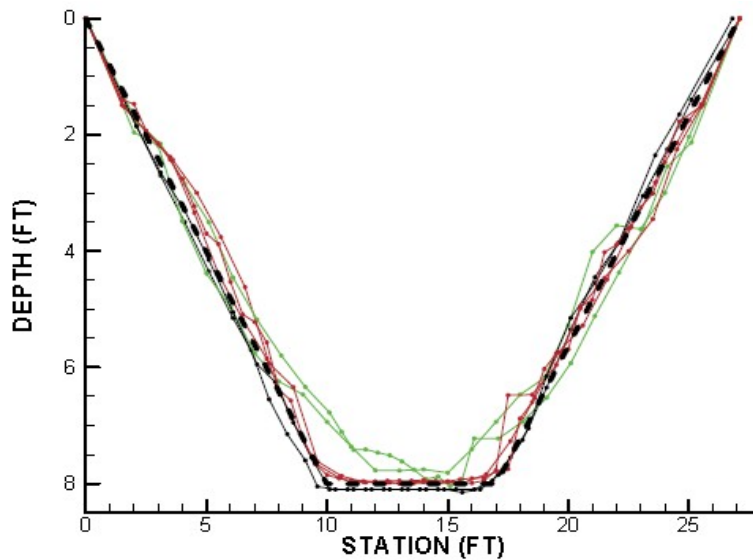
מדידה 2: הספיקה הכוללת במד זרם מדחף נמצאה גבוהה ב- 2.7% מהספיקה לפי עקום רום ספיקה. הספיקה הכוללת על סמך ממוצע שני חתכי רוחב בהסעה רציפה במכשיר StreamPro הייתה נמוכה ב- 2.1% מהספיקה לפי עקום רום ספיקה. במכשיר QLiner בוצע חתך אחד באנכים ספציפיים והספיקה הייתה נמוכה ב- 0.2% מהספיקה לפי עקום רום ספיקה.

באיור 20 מוצג חתך הזרימה שהתקבל בשני המכשירים ובמד הזרם מדחף בהשוואה לחתך הזרימה הטרפזי. נראה כי למכשיר StreamPro יש הערכות חסר גדולות יותר בקביעת החתך, במיוחד סמוך לגדות, כנראה בשל מדידת העומק בכל ארבעת הקרניים. לעומתו, מכשיר QLiner מדויק יותר.

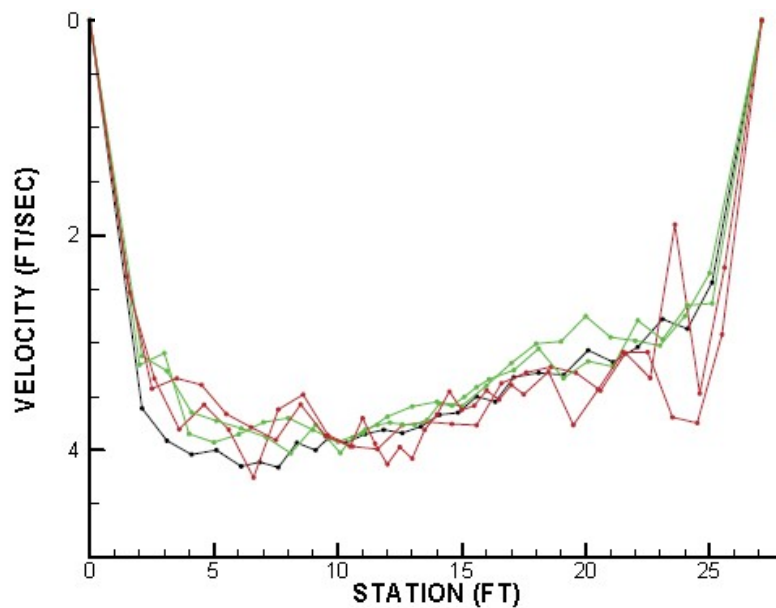
באיור 21 ניתן לראות את המהירות הממוצעת בחתכים השונים, כפי שנמדדה במדידה 1, בשני מכשירי ADCP ובמד הזרם מדחף. המגמה זהה בכל המכשירים, אולם ל-QLiner שונות גדולה יותר, יתכן בשל קצב איסוף הנתונים הנמוך יותר.

לסיכום, מדידות המהירות שבוצעו במכשיר ה-StreamPro מלוות בפחות רעש רקע, יתכן עקב תדירות המדידה הגבוהה יותר וריבוי קרניים. לעומתו QLiner מדויק יותר בהערכת פרופיל

הקרקעית, כנראה בגלל שיש לו פחות קרניים. הספיקה הכוללת במכשיר QLiner קרובה יותר לעקום רום ספיקה, יתכן בשל יכולתו להעריך טוב יותר את החתך הנמדד (Frizzell and Vermeyen, 2007). יש לשים לב כי הניסוי בוצע בתעלה יציבה, צרה ועמוקה יחסית, בעלת זווית חדות. יתכן כי בתעלה רחבה בעלת שינויים הדרגתיים בפרופיל הרוחב אי הדיוק במדידת החתך ובעקבות כך בחישוב הספיקה יהיה קטן יותר. לעומת זאת, אי הדיוק במדידה בנחל טבעי בו יש תנועה של התשתית (גרופת) וארוזיה של הגדות יכול להיות גדול יותר.



איור 20: חתך הזרימה בתעלה (קו שחור מקווקו), מד זרם מכני (שחור), StreamPro (ירוק), QLiner (אדום) (מתוך: Frizzell and Vermeyen, 2007).



איור 21: מהירות זרימה ממוצעת בחתכים: מד זרם מכני (שחור), StreamPro (ירוק), QLiner (אדום) (מתוך: Frizzell and Vermeyen, 2007).

11. השוואה בין StreamPro למד זרם מדחף ומד זרם אלקטרומגנטי בנחל טבעי

בפרק זה תוצג השוואה בין StreamPro ADCP לבין מד זרם מדחף מדגם F1 ומד זרם אלקטרומגנטי מדגם FlowSens של חברת SEBA. המדידות בוצעו בתאריך 22.12.10 כחלק מהשתלמות של המחבר בחברת SEBA ובשיתוף עם חברת HydroVision. ההשוואה בוצעה בין מהירות הזרימה שנמדדה במיקום ספציפי, מהירות ממוצעת בחתך, שטח חתך וספיקה כוללת.

11.1. רקע

מיקום המדידות בנחל Wertach בסמוך לכפר Pforzen, דרום גרמניה (איור 22). מקור נחל Wertach באלפים והוא זורם לאורך כ- 150 ק"מ בכיוון כללי צפונה עד שמתחבר לנחל Lech. המדידות בוצעו לאורך חתך רוחב שרוחבו 29.7 מ' ועומקו המקסימאלי כ- 80 ס"מ (איור 20). במשך המדידה לא נצפו שינויים במפלס המים בנחל.

11.2. מדידה ועיבוד נתונים

עומק הקרקעית לאורך חתך הזרימה נמדד במרווחים שווים של 0.5 מ' (איור 24). שני מדי הזרם, מדחף ואלקטרומגנטי, הותקנו על מוט מדידה (איור 22). מדידות מהירות זרימה בוצעו ב- 10 אנכים במרחקים שווים, כאשר בשבעה אנכים בוצעו מדידות ב- 4 עומקים יחסיים (0.2, 0.4, 0.6, 0.8) לאורך האנך. בשלושת האנכים העמוקים ביותר בוצעו 6 מדידות בכל אנך, 2 מיקומים נוספים סמוך לפני המים ולקרקעית (איור 24). בכל מיקום בוצעו 2-5 חזרות כתלות בהבדלים בין המדידות. משך כל מדידה הינו חצי דקה. הנתונים עובדו בתוכנת Software Q, בה הספיקה הכוללת מחושבת בשיטת (ISO 748, 2007) Depth Velocity Integration.

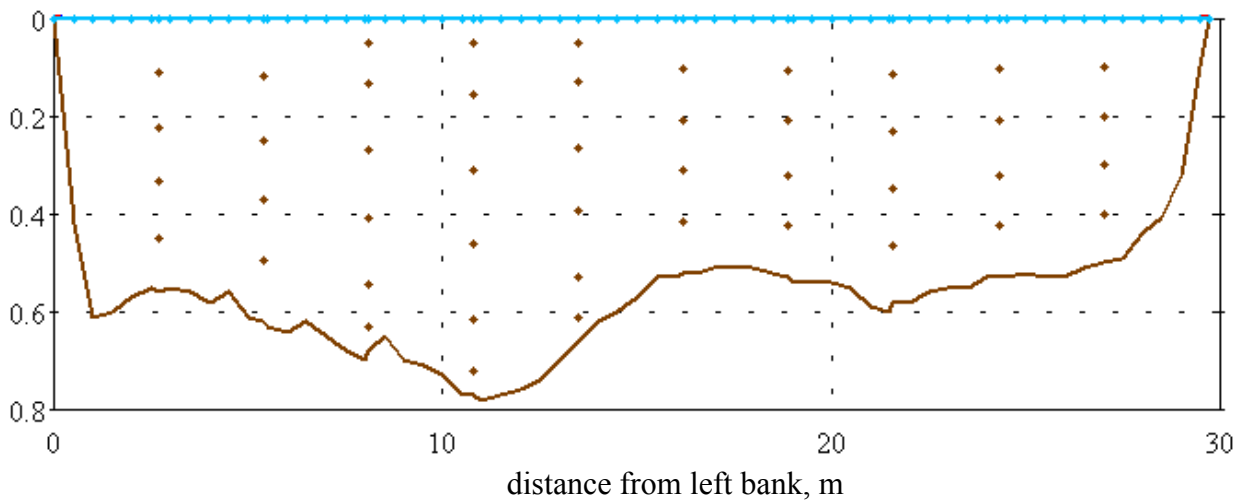
מכשיר ה- StreamPro ללא מצפן או GPS הופעל בשתי שיטות (איור 23). האחת הינה moving boat, בה המכשיר הושט מגדה לגדה ב- 5 חזרות. ניתן לראות באיור 25 את חתך הזרימה המוצג בשיטה זו בהשוואה לחתך הזרימה בפועל (איור 24). חושבה הספיקה הכוללת, שטח החתך ומהירות זרימה ממוצעת. נתונים אלה עובדו בתוכנת WinRiver. השיטה השנייה הינה באנכים ספציפיים (section by section), בה בכל אנך בוצעה מדידה במשך כדקה. הנתונים יוצאו מתוכנת WinRiver ועובדו באופן גולמי, ולאחר מכן הועברו לתוכנת Software Q לחישובי ספיקה כוללת, שטח חתך ומהירות ממוצעת.



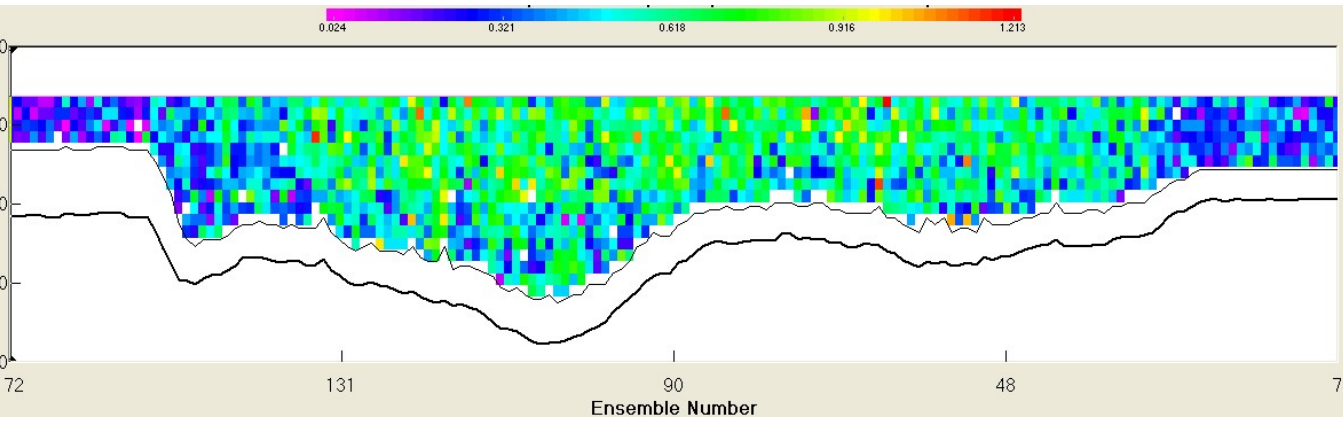
איור 22: (1,2) מיקום המדידות לאורך נחל Wertach בסמוך לכפר Pforzen (מקור: Google Earth, 13.1.2011); (3) חתך הרוחב ו- Peter Krueger בזמן המדידות עם מד זרם אלקטרומגנטי מדגם FlowSense.



איור 23: מדידה ב- StreamPro ADCP (בתמונה: Peter Krueger).



איור 24: חתך הרוחב: קרקעית הנחל (קו חום), מיקום מדידות במד זרם אלקטרומגנטי ומדחף (נקודות חומות), פני המים (קו כחול) ומיקום מדידות של חתך הרוחב (נקודות כחולות).



איור 25: חתך הזרימה כפי שנמדד ב- StreamPro ADCP בשיטת הסעה רציפה מתוך תוכנת WinRiver. ציר x מייצג מספר אנך (ensemble), ציר y עומק מפני המים (מטר) והצבעים מייצגים מהירות זרימה בסדר עולה (0.02-1.2 מטר\שניה); ורוד, סגול, כחול, תכלת, ירוק, צהוב ואדום.

11.3. תוצאות

בטבלה 1 מוצגים ההבדלים במהירות הזרימה במיקום ספציפי. במד זרם מדחף ההבדלים בין החזרות הינם 5% בממוצע (טווח: 0-22%). במד זרם אלקטרומגנטי ההבדלים בין החזרות הינם 16% בממוצע (טווח: 2-35%). ההבדל בין שני מדי הזרם הנ"ל הינו 0.4% בממוצע (טווח: 0-28%). ההבדל בין שני מדי הזרם הנ"ל לבין ADCP הינו 0.4% בממוצע (טווח: 1-13% ללא חריגים). מדידות חריגות (עד 29% בהשוואה למדי הזרם מדחף ואלקטרומגנטי) התגלו ב- ADCP בסמוך לקרקעית. השפעה של מדידות אלה על הספיקה הכוללת או ממוצע מהירות הזרימה הינה זניחה.

בטבלה 2 מוצגים חישובי הספיקה הכוללת, שטח חתך ומהירות ממוצעת בכל מדי הזרם. במדי זרם מדחף ואלקטרומגנטי אין הבדלים משמעותיים בין החזרות (עד 2%). יש לשים לב שלמרות ההבדלים המשמעותיים במדידת מהירות זרימה במיקום ספציפי (טבלה 1), אין הבדל גדול בין המשתנים המשקללים בתוכם את כל אוסף המיקומים (ספיקה ומהירות זרימה ממוצעת) בשל מדידת מספר מייצג של מיקומים בחתך הזרימה. המשתנים ספיקה הכוללת, שטח חתך ומהירות זרימה ממוצעת שנמדדו ב- StramPro בשתי השיטות דומים מאוד (עד 2% הבדל) לאלה שנמדדו במד זרם מדחף ואלקטרומגנטי.

טבלה 1: ההבדלים במהירות זרימה במיקום ספציפי. המדידות במד זרם מדחף (F1) ומד זרם אלקטרומגנטי (EM) בוצעו במשך 30 שניות (2-5 חזרות). ההבדלים בין המכשירים הם בין ממוצע החזרות במכשיר אחד לממוצע החזרות במכשיר השני. המדידות ב-StreamPro ADCP נמשכו כדקה. ההבדלים הינם בין תוצאות ה-StreamPro ADCP לבין ממוצע בין מד זרם מדחף ומד זרם אלקטרומגנטי.

	propeller F1	EM FlowSens	StreamPro
avg. fluctuation, %	5	16	-
fluctuation range, %	0-22	2-35	-
avg. difference, %	0.4 (F1 to EM)		0.4 (F1 and EM to SP)
difference range, %	0-28 (F1 to EM)		1-13 (F1 and EM to SP)

טבלה 2: ספיקה כוללת, שטח חתך ומהירות ממוצעת. מוצגות 3 חזרות במכשירים מד זרם מדחף (F1) ומד זרם אלקטרומגנטי (EM). מוצגות תוצאות שתי השיטות במכשיר StreamPro (section by section ו-moving boat).

	propeller F1				EM FlowSens				StreamPro	
	1	2	3	all	1	2	3	all	moving boat	section by section (without cells close to bed)
discharge, m ³ /s	8.71	8.63	8.66	8.67	8.71	8.67	8.54	8.65	8.70	8.75
area, m ²	16.5	16.5	16.5	16.5	16.5	16.5	16.5	16.5	16.6	16.5
									Q/A	
v mean, m/s	0.53	0.52	0.52	0.53	0.53	0.53	0.52	0.53	0.52	0.53

11.4. מסקנות

ההבדלים בין המשתנים ספיקה ומהירות ממוצעת, הכוללים שקלול מספר מייצג של מיקומים מדידה קטנים מאוד בכל מכשירי המדידה (עד 2%). בשל שינויים מקומיים בתנאי הזרימה, ישנה חשיבות במדידה בפרק זמן מייצג בכל מדי הזרם. במד זרם מדחף ואלקטרומגנטי יש להוסיף מדידת מספר מייצג של מיקומים בחתך. מניתוח חתך הזרימה ניתן להסיק שישנה חשיבות למדידה מייצגת של חתך הזרימה ע"י מדידה במרווחים קטנים באזורים בעלי שינויים משמעותיים בתשתית הנחל. יש לציין כי הזרימה הייתה קבועה ולא מאוד מהירה וכי בשיטפונות הטעויות עלולות להיות גדולות יותר.

12. ביבליוגרפיה

- עבודה עם מכשיר "StramPro" והנחיה של אנשי חברת SEBA Hydrometrie GmbH וחברת HydroVision כחלק מהשתלמות של הכותב בחברה למשך שלושה חודשים במימון משרד המדע הגרמני (BMBF).
- בן-צבי א., שחף נ. וצדקה א., (2010). נחלים וניקוז- תהליכים, הנדסה ותכן. באר שבע: רשות ניקוז שקמה בשור.
- כהן ח., (2005). הסעת סחף בשיטפונות באזור צחיח, נחל רחף, מדבר יהודה. מחקר לשם מילוי חלקי של הדרישות לקבלת תואר לפילוסופיה, המחלקה לגאוגרפיה ופיתוח סביבתי. באר שבע: אוניברסיטת בן גוריון בנגב.
- Alexandrov Y., Cohen H., Laronne J. B., Reid I., (2009). Suspended sediment load, bed load, and dissolved load yields from a semiarid drainage basin: A 15-year study. *Water Resour. Res.*, 45.
- Brekhovskih L. M., Lysanov Y. P., (2003). *Fundamentals of Ocean Acoustics*. New York: Springer.
- Chen, C. L., (1991). Unified theory on power laws for flow resistance. *Journal of Hydraulic Engineering*, 117(3), 371.
- Cheng, N. S. (2007). Power-law index for velocity profiles in open channel flows. *Advances in Water Resources*, vol. 30, issue 8, pp. 1775-1784.
- Frizell K. W., Vermeyen T. B., (2007). Comparing Apples and Oranges: Teledyne/RDI SreamPro ADCP and OTT QLiner river discharge measurement system. A report of the Bureau of Reclamation, Water Resources Research Lab. Report ID: PAP-965, Denver, U.S.A.
- Gaeuman D., Pittman S., (2010). Relative contributions of sand and gravel bedload transport to acoustic Doppler bed-velocity magnitudes in Trinity River, California. *US. Geol. Surv. Report* 2010-5091.
- Gunawan B., Streling M., Knight D. W., (2010). Using an acoustic Doppler current profiler in a small river. *Water and Environment Journal*, vol. 24, pp. 147-158.
- Holdway G. P., Thorne P. D., Flatt D., Jones S. E. and Prandle D., (1999). Comparison between ADCP and transmissometer measurements of suspended sediment concentration. *Continental Shelf Research*, vol. 19, pp. 421-441.
- ISO 748 E (2007). *Hydrometry - Measurement of liquid flow in open channels using current-meters or floats*. ISO, Geneva, Switzerland.

- Johnson K. K., Loving B. L., (2002). Use of an acoustic Doppler current profiler to measure hypersaline bidirectional discharge. Hydraulic Measurements and Experimental Method Conference, Colorado, Am. Soc. Civ. Eng.
- Kim Y. H., Voulgaris G., (2003). Estimation of suspended sediment concentration in estuarine environments using acoustic backscatter from an ADCP. Proceedings of the International Conference on Coastal Sediments 2003, CD-ROM published by World Scientific Publishing Corp. and East West Productions, Corpus Christi, Texas, USA.
- Kostaschuk R., Best J., Villard P., Peakall J., Franklin M., (2005). Measuring flow velocity and sediment transport with an acoustic Doppler current profiler. *Geomorphology*, vol. 68. pp. 25-37.
- Lu J. Y., Su C. C., Wang C. Y., (2006). Application of a portable measuring system with acoustic Doppler current profiler to discharge observations in steep rivers. *Flow Measurements and Instrumentation*, vol. 17, pp. 179-192.
- Mueller D. S., Wagner C. R., (2006). Application of the Loop Method for correcting Acoustic Doppler Current Profiler discharge measurements biased by sediment transport. US. Geol. Surv. Report 2006-5079, Reston, Virginia.
- Mueller D. S., Wagner C. R., (2009). Measuring Discharge with Acoustic Doppler Current Profilers from a Moving Boat. Chapter 22, Book 3, Section A, US. Geol. Surv. Report 8016-20, Reston, Virginia.
- Muste M., Yu K., Pratt T., Abraham D., (2004). Practical aspects of ADCP data use for quantification of mean river flow characteristics: Part II: fixed-vessel measurements. *Flow Measurements and Instruments*, vol. 15, pp. 17-28.
- Oberg K., (2002). In search of easy-to-use method for calibrating ADCP's for velocity and discharge measurements. Proc. Hydraulic Measurements and Experimental Method Conference, Colorado, Am. Soc. Civ. Eng.
- Simpson M. R., Olthmann R. N., 1993. Discharge measurement system using an acoustic Doppler current profiler with applications to large rivers and estuaries. US. Geol. Surv. water-supply paper 2395, Washington.
- Simpson M. R., (2001). Discharge measurements using a Broad-Band Acoustic Doppler Current Profiler. US. Geol. Surv., Sacramento, California.

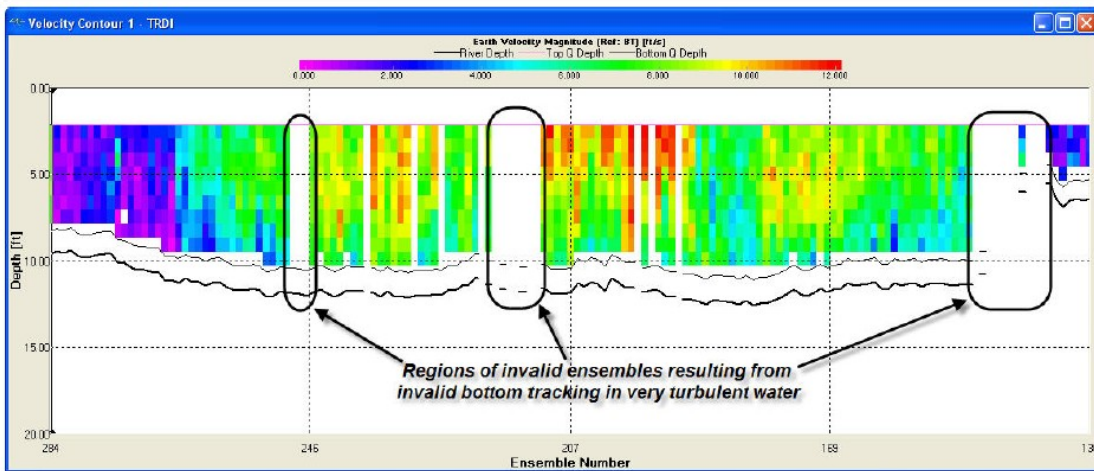
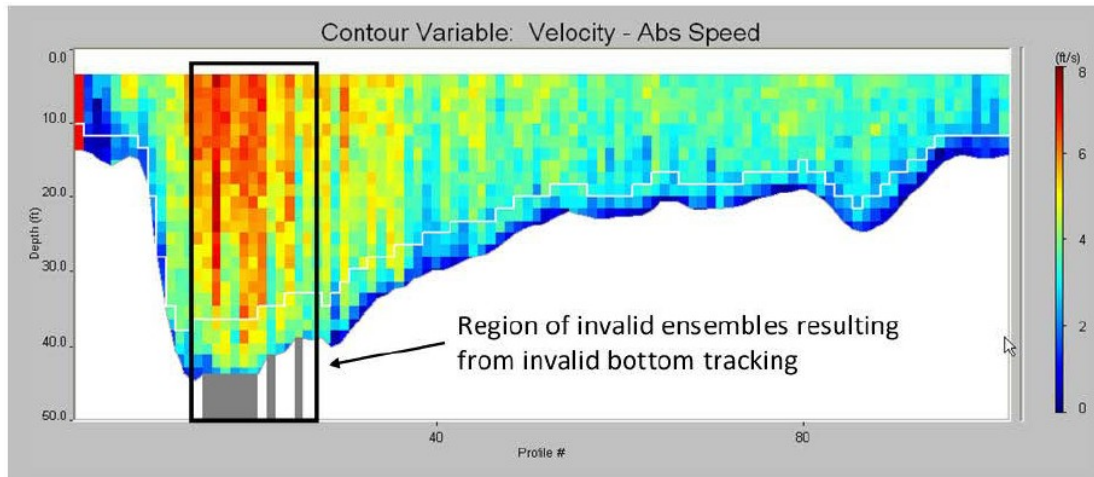
- Simpson J. H., Fisher N. R., Wiles P., (2004). Reynolds stress and TKE production in an estuary with a tidal bore. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, vol. 60, pp. 619-627.
- Teledyne RD Instruments (TRDI), (2006). Acoustic Doppler Current Profiler principles of operation a practical primer. Third edition for Broadband ADCPs, P/N 951-6069-00.
- Teledyne RD Instruments (TRDI), (2009). StreamPro ADCP operation manual. P/N 95B-6003-00.
- World Meteorological Organization (WMO). (2010). Manual on stream gauging, volume 1- fieldwork. WMO-No. 1044.

נספח 1: דגשים להפעלה נכונה של המכשיר

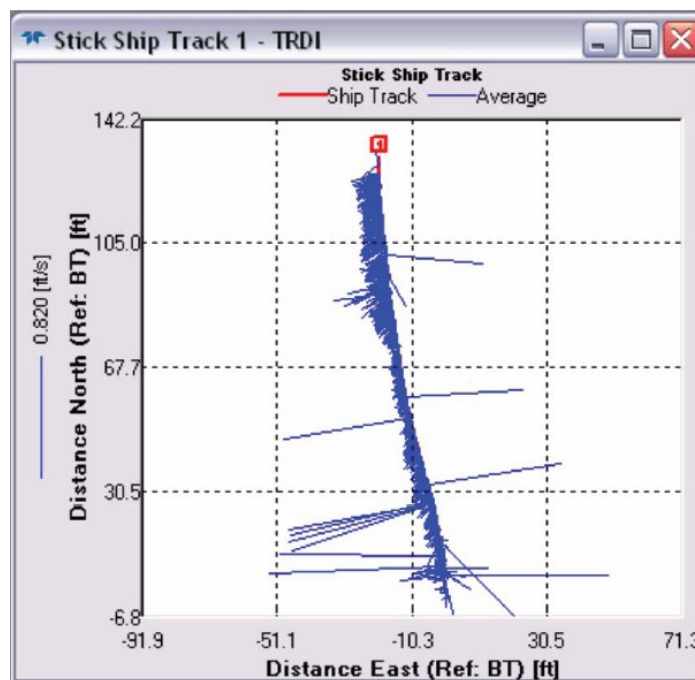
1. רצוי למדוד בחתך בעל גיאומטריה אחידה וסימטרית בקטע ישר יחסית, לא נפתולי וללא צמחיה. רצוי שמהירות הזרימה תהיה גבוהה מ- 1 מ' לשניה. רצוי לבצע מדידה ראשונית בכדי לבדוק האם החתך מתאים.
2. יש לשים לב להגדיר נתונים בצורה נכונה.
3. חשוב להמתין שחיישן הטמפרטורה יתייצב לאחר הכנסתו למים ולכן יש להמתין מספר דקות (בייחוד לאחר ששהה ברכב חם).
4. יש למצוא עומק ומהירות מקסימליים לאורך החתך בכדי להזין נתונים אלה למכשיר לפני המדידה.
5. דרושה הערכה נכונה של המרחק בין הגדה למכשיר (אזור שלא נמדד). יש צורך במינימום 2 טאים בחתך האחרון. יש לסמן גבולות אלה ולחזור אליהם בכל פעם. חשוב לא לעבור סימונים אלה בזמן המדידה בכדי לא לשבש את מדידת החתך.
6. יש לשים לב לגאומטריה הגדות ולבדוק האם מתאימה לקירוב של משולש. אם לא ניתן לתקן זאת.
7. יש לבצע בדיקה לתנועת תשתית הנחל. הבדיקה תתבצע למשך 10 דקות במידה וניתן. אם יש תנועת תשתית, המהירות והספיקה הנמדדות תהיינה נמוכות מאשר בפועל. בכדי להעריך את מהירות תנועת התשתית יש לבצע בדיקות במיקומים שונים לאורך החתך וכך ניתן להעריך מהירות וספיקה בפועל.
8. רצוי לבדוק האם העומק שהמכשיר מעריך הינו מדויק ע"י שימוש בשיטה אחרת למדידת עומק.
9. באנכים ראשון ואחרון יש להמתין זמן רב יותר בכדי לקבל נתונים אמינים יותר כיון שעל סמך נתונים אלה מתבצעת האינטרפולציה. מקובל מינימום 10 אנכים טובים (ensembles).
10. מהירות חציית הערוץ לאורך החתך צריכה להיות נמוכה ממהירות זרימה ממוצעת.
11. חשוב לוודא שחציית הערוץ תבוצע באופן אחיד.
12. במידה וניתן, יש לבצע מינימום 4 חתכים ועדיף 6 חתכים בכדי שיהיה ניתן להשוות בין הספיקות המתקבלות ולחשב את טעות המדידה. במידה ולא ניתן לבצע מספר חזרות זה, יש לשאוף לפחות לשני חתכים, הלוך וחזור.
13. בהתקנה על סירה יש לשים לב שהמכשיר לא יהיה ליד גושי ברזל או מכשירים שמייצרים שדה מגנטי כגון גנרטור, בטריות, מצברים ומנוע. יש לשים לב שהמכשיר אינו מושפע מתנועת הסירה או המנוע.

נספח 2: מדדי איכות

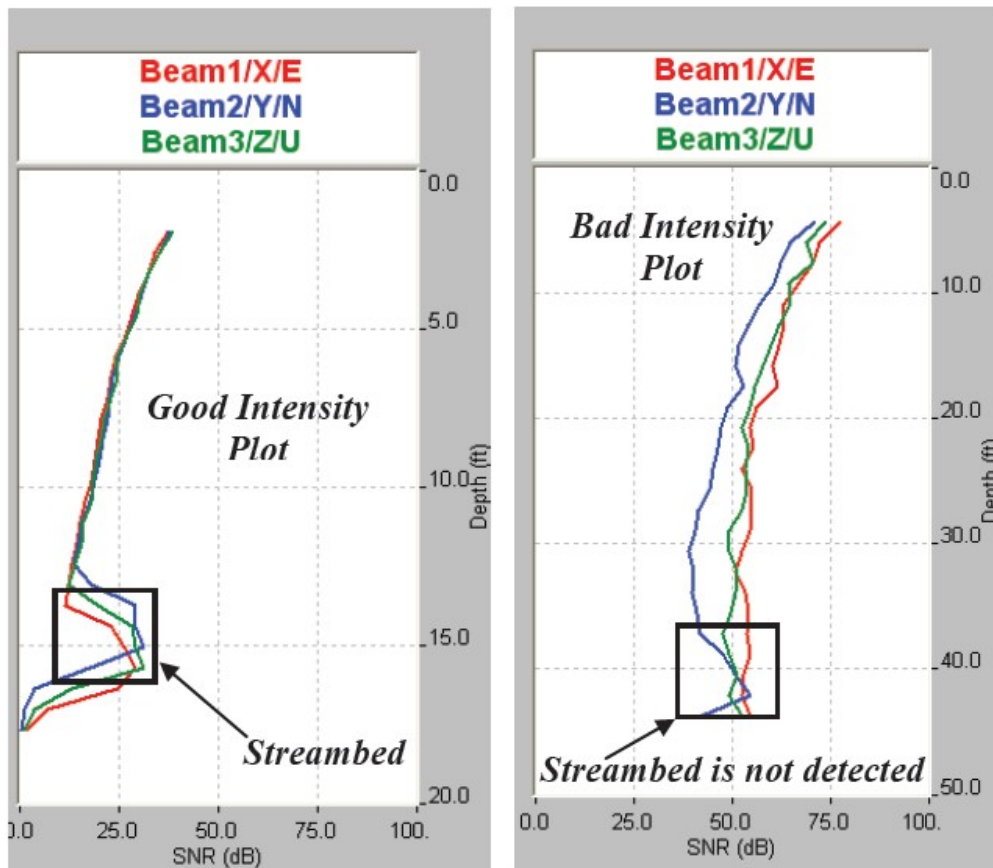
1. הרבה תאים ללא מדידות שיכולים להיווצר בגלל בעיות תקשורת או בעיות אחרות מעידים על איכות מדידה נמוכה.
2. חתכים שלמים שלא נמדדו כתוצאה מחוסר יכולת למדוד עומק תשתית, מערבולות גבוהה, ריכוז סדימנטים גבוה או נוכחות דגים מעידים על איכות מדידה ירודה (איור 26).
3. חשוב שפרופיל המהירות יהיה אחיד. אם ישנן קפיצות בפרופיל המהירות (איור 27) יתכן והן נובעות מאי הבחנה בהפרש פאזות.
4. ההחזר אמור לקטון באופן הדרגתי לכיוון הקרקעית ושם לקפוץ בצורה חדה (איור 28).
5. פרופיל ההחזר של 4 הקרניים אמור להיות דומה (איור 29).
6. מהירות חצית הערוץ אחידה ונמוכה מהמהירות הממוצעת (איור 30).
7. פרופיל התשתית צריך להיות אחיד ותואם למציאות (איור 31).
8. מדידה של מינימום 60% מהספיקה.
9. לאחר ביצוע מספר חתכים, סטיית התקן של הספיקה בין החתכים השונים לבין הספיקה הממוצעת (לכל החתכים) לא תעלה על 5%.
10. במדידה מסירה יש לבדוק שאין הבדלים בין החתכים שמבוצעים לכיוון אחד לבין החתכים שמבוצעים לכיוון השני.



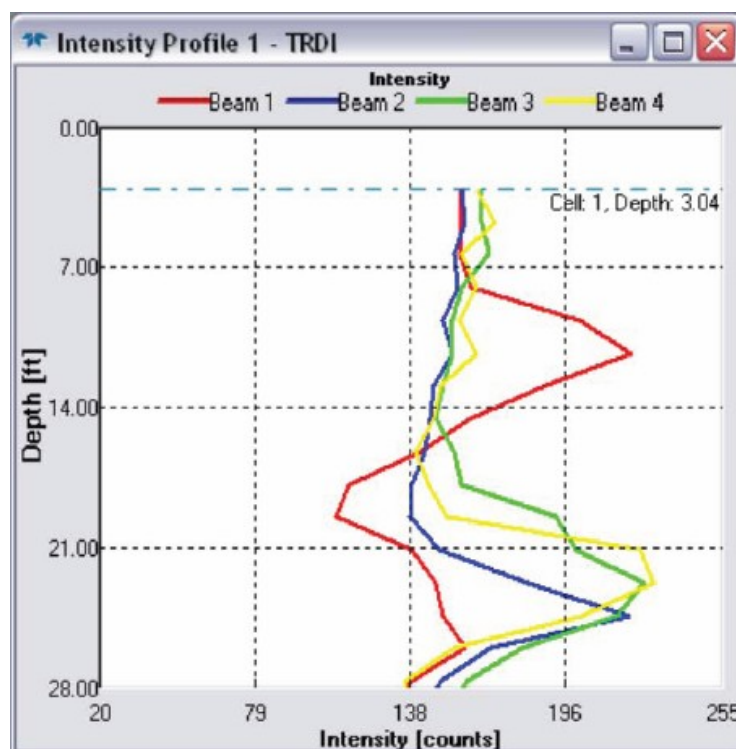
איור 26: דוגמה לחתכים בהם אנכים לא נמדדו עקב חוסר יכולת למדוד קרקעית (למעלה) או מערבולות גבוהה (למטה) (מתוך: Mueller and Wagner, 2009).



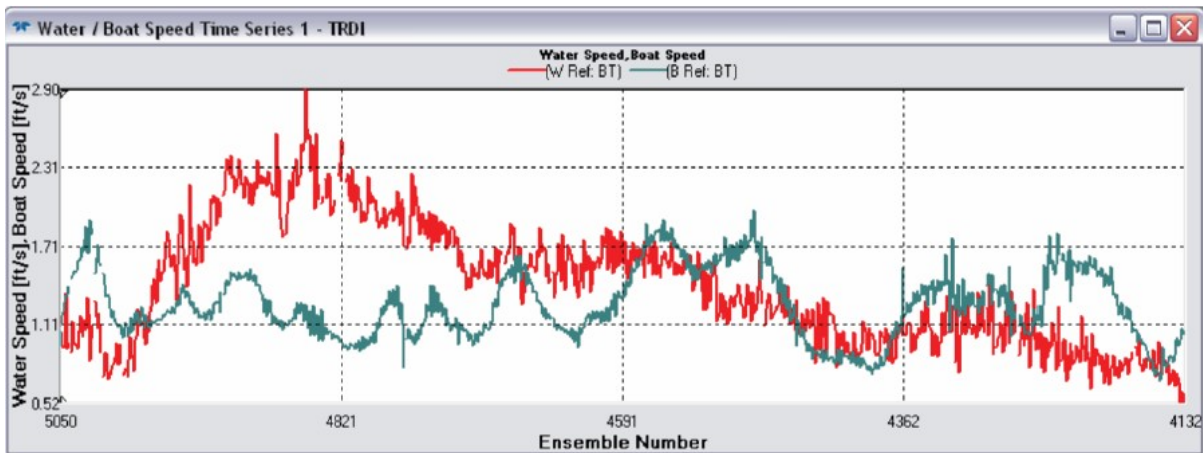
איור 27: קפיצות בפרופיל המהירות (מתוך: Mueller and Wagner, 2009).



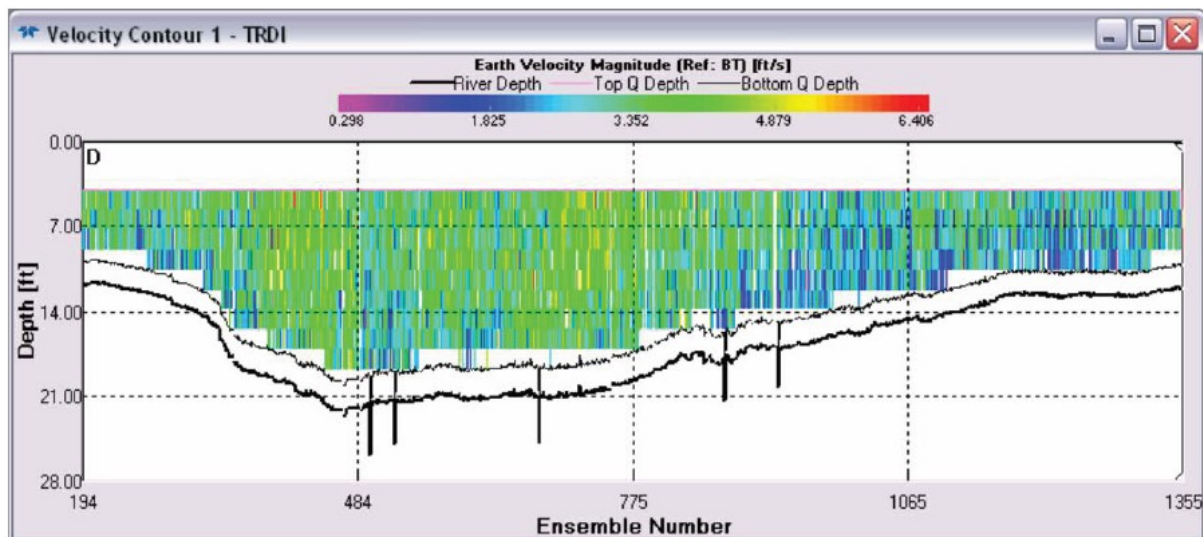
איור 28: מצד שמאל פרופיל החזרה תקין ואילו מצד ימין פרופיל החזרה לא תקין (מתוך: Mueller and Wagner, 2009).



איור 29: פרופיל ההחזר של הקרן האדומה מופרע ומרמז על בעיה במדידה (מתוך: Mueller and Wagner, 2009).



איור 30: מהירות החצייה (באדום) אינה אחידה וגבוהה ממהירות הזרימה הממוצעת (בירוק) (מתוך: Mueller and Wagner, 2009).



איור 31: פרופיל תשתית הנראה בלתי אחיד (מתוך: Mueller and Wagner, 2009).