

האוניברסיטה העברית בירושלים
THE HEBREW UNIVERSITY OF JERUSALEM



ביה"ס למדע ישומי ע"ש פרדי ונדין הרמן
היחידה למדעי הסביבה

דו"ח מדעי שנתי (מס' 2)

אצות וחלקיקים מרחפים במי הירקון:
אפיונם, גורלם ובקרתם

מוגש ל:

משרד לאיכות הסביבה

ע"י

אבנר עדין

איריס זוהר

לובה רובינשטיין

נובמבר 2000, ירושלים



60513881

האוניברסיטה העברית בירושלים
THE HEBREW UNIVERSITY OF JERUSALEM



ביה"ס למדע ישומי ע"ש פרדי ונדין הרמן
היחידה למדעי הסביבה

דו"ח מדעי שנתי (מס' 2)

אצות וחלקיקים מרחפים במי הירקון:
אפיונם, גורלם ובקרתם

מוגש ל:

משרד לאיכות הסביבה

ע"י

אבנר עדין

איריס זוהר

לובה רובינשטיין

נובמבר 2000, ירושלים

הבעת תודה

ברצוננו להודות לצוות רשות נחל הירקון על היוזמה לעריכת המחקר, על שיתוף הפעולה המתמשך והמועיל בביצוע המחקר, ליונתן ופיליפ על העזרה המעשית בשטח ובעצות טובות, לרוזי על העזרה המנהלית וכמובן למנהל הרשות דוד פרגמנט.

ברצוננו להודות לפרופ' אינקה דור על העזרה והייעוץ לאורך כל המחקר.

כמו כן, ברצוננו להביע תודתנו למעבדה למיקרוביולוגיה סביבתית ביחידה למדעי הסביבה, ביה"ס למדע ישומי, האוני' העברית ולמעבדה לחקר הכינרת על העזרה בחקר אופטיקת אצות.

העבודה נעשתה במימון המשרד לאיכות הסביבה, כחלק מעבודת המוסמך של איריס זוהר.

פרופסור אבנר עדין

תקציר

בנחל הירקון אוכלוסיית חלקיקים בעלת אופי אורגני בדיכ, שעיקרם בפרקציות הגודל שקטנות מ- $10\mu\text{m}$. עומס חלקיקים גבוה שנצפה בנחל קנה ($\text{TSS}=151\text{mg/L}$) פוחת במהרה (40mg/L אחרי כ- 150 מ'). שיקוע החלקיקים הוא הסיבה להרחקתם החלקית ממי הנחל, במהלך זרימתו. שיקוע חלקיקים (חלקיקי סחף, אצות, חומר אורגני מרחף במי קולחין), הוא תהליך הכולל גורמים בעלי השפעות שונות וסותרות לעיתים. משקל סגולי וגודל הם גורמים המשפיעים ישירות על שיקוע החלקיקים. לעומת זאת, ריכוזי החלקיקים והחוזק היוני של מי הנחל, משפיעים באופן עקיף על ההרחקה, שכן להם יש השפעה על מנגנון הקואגולציה וההפתה, המביא ליצירת צברי חלקיקים, בעלי מהירות שיקוע גבוהה יותר.

שנת המחקר הנוכחית הוקדשה למעקב אחר תהליכי שיקוע החלקיקים בנחל הירקון. הדבר בוצע במעבדה, בעמודה שקופה, בעלת רוחב של כ- 30 ס"מ ואורך בשימוש של כ- 170 ס"מ. בתחילה, נערכו ניסויי שיקוע על כל אחת מארבע התחנות המייצגות שנבחרו בשנת המחקר הקודמת. בהמשך נערך ניסוי מקיף יותר על מים מהתחנה שבע טחנות. מים מהנחל הובאו למעבדה ונערכו עליהם מדידות שונות כמו עכירות התחלתית, פוטנציאל ζ , מוצקים מרחפים ועוד. עיקר המעקב אחר שיקוע החלקיקים במים היה באמצעות מונה חלקיקים, שמודד את סך החלקיקים ואת התפלגותם לפי פרקציות גודל. תנועת החומר האורגני נבחנה בקנה מידה קטן בהרבה (משורה בת שני ליטר) ובאמצעות קריאת בליעת אור UV ומדידות פחמן אורגני כללי (TOC).

ניסויי השיקוע בתחנות השונות הראו כולם תופעה של תנודות חריפות בריכוזי החלקיקים, במקום הרחקה רציפה שלהם מגוף המים. קצב השיקוע השתנה בין התחנות ואף בין העונות: לאחר 10 שעות שיקוע, נמצא כי קצב הרחקת החומר המרחף היה בין 10% בשבע טחנות בקיץ ל- 50% באבו רבאח בחורף. ניתוח נתוני השיקוע בניסוי שנערך בשבע טחנות במאי 2000, הביא למסקנה כי תהליכי קואגולציה והפתה מתרחשים באופן משמעותי בעמודת המים. הדבר מסתמך בעיקר על ניתוח התפלגות גודלי החלקיק לאורך הניסוי, השוואת תוצאות מונה החלקיקים לעכירות והמעקב אחר שיקוע החומר האורגני. גורמים אחרים העלולים להיות מעורבים בתהליכי ההפתה בנחל: האצות בנחל הירקון אינן מעודדות משמעותית שיקוע חלקיקים באמצעות פוליסאכרידים חוץ תאיים, משום העדר חלקיקים מינרליים ביחס מתאים לאצות ובריכוז מספק. מכאן, שלאצות רק השפעה שלילית על הרחקת חומר מרחף ממי הנחל בהיותן בעלות משקל סגולי נמוך; העכירות, המבטאת את ריכוז החלקיקים, היתה בינונית למדי (כ- 25 NTU) ולא הבטיחה התנגשויות רבות בין החלקיקים; פוטנציאל ה- ζ מלמד על יציבות יחסית של החלקיקים (ממוצע של כ- -20mV) וכך גם ריכוזים גבוהים של חומר אורגני מסיס במי הנחל. כך גם נמצא כי נוכחות חלקיקים מינרליים מגבירה את שיעור הרחקת החומר האורגני מהמים.

כדי לשפר את איכות מי נחל בכלל וכן להאיץ את תהליכי ההפתה המסייעים בטיהור העצמי, יש להפחית את העומס האורגני לפני כניסתו. הדבר יכול להעשות ע"י "אגנים ירוקים" בתוואי נחל קנה, לפני השפכו לירקון, או לחילופין בסינון איטי באותו מקום. בקטעי נחל בעלי זרימה איטית מאד או אף מים "עומדים", ניתן לטפל ע"י סחרור דרך תעלות מרבג ("דיאליות נחלי"). אמצעים אלו יביאו להרחקת חלקיקים (אורגניים ומינרליים) מהמים והפתת הנוטריינטים המסייעים בפריחות אצות. שימוש חוזר במי הנחל יכול להעשות באמצעות טיפול (בהתאם ליעד השימוש) במים במורד הנחל, לפני העירבוב עם מי הים.

בשנת המחקר הבאה ייערכו ניסויי סימולציה לחקר תהליכי הטיפול להרחקת אצות וחלקיקים אחרים ובקרת ריכוזיהם במים. התהליכים שייבדקו לחוד ובמשולב יכללו הפתה, סינון גרגרי וסינון דרך ממברנות וזאת כדי לענות גם על צרכים ישומיים עתידיים בשימוש עירוני וחקלאי.

רשימת ציורים

עמוד	
2	ציור 1: טווח הגדלים של החלקיקים (Amirtharajah and O'Melia, 1990)
3	ציור 2: הצגה סכמטית של הקולואיד הטעון שלילית וסביבותיו (Amirtharajah and O'Melia, 1990)
4	ציור 3: סכמת הכוחות הפועלים על חלקיק בזורם
6	ציור 4: הכוחות הפועלים על חלקיק, כפונקציה של המרחק (O'Melia et al., 1996)
7	ציור 5: a. צבר חרסית - <i>Chlamydomonas</i> (x1470), b. צבר חרסית - <i>Anabaena</i> (x1200) (Avnimelech et al., 1982)
8	ציור 6: פלוקולציה דו שלבית של חרסיות ואצות (Avnimelech et al., 1982)
12	ציור 7: התפתחות אזורים ב-Zone Settling (Peavy, 1985)
18	ציור 8: אמצעי המעקב אחר שיקוע החלקיקים במחקר של Holdich and Butt (1997)
22	ציור 9: תאור סכמתי של הגורמים העיקריים המשפיעים על החומר המרוחף ומשמעותם
27	ציור 10: התפלגות גודל החלקיק בתחנות הדיגום
28	ציור 11: השתנות TPC שארייתי ב-30 השעות הראשונות, אבו רבאח
29	ציור 12: שינוי PSD במהלך הניסוי, אבו רבאח
29	ציור 13: TPC שארייתי ב-30 השעות הראשונות, תע"ש +3000
30	ציור 14: TPC שארייתי לאורך הניסוי, תע"ש +3000
30	ציור 15: שינוי ה-PSD לאורך הניסוי, תע"ש +3000
31	ציור 16: עכירות שארייתית לאורך הניסוי, עומק 30 ס"מ, תע"ש +3000
31	ציור 17: TPC שארייתי ביממה הראשונה, שבע טחנות
32	ציור 18: שינוי ה-PSD לאורך הניסוי, שבע טחנות
32	ציור 19: TPC שארייתי ב-30 השעות הראשונות, מורד איילון
33	ציור 20: TPC שארייתי לאורך הניסוי, מורד איילון
33	ציור 21: שינוי PSD במהלך הניסוי, מורד איילון
34	ציור 22: TPC שארייתי ביום הראשון של הניסוי
34	ציור 23: TPC השארייתי למשך כל זמן הניסוי, שבע טחנות
35	ציור 24: התפלגות גודלי החלקיק במהלך הניסוי, בעומק 30 ס"מ, שבע טחנות
35	ציור 25: השתנות ריכוז הפרקציה 3-5µm לאורך העמודה, ביום הראשון
37	ציור 26: שינוי ה-TOC לאורך הזמן, 25-27/7/2000
38	ציור 27: שינוי בליעת UV, 25-27/7/2000
38	ציור 28: שינוי ריכוז החלקיקים השארייתי עם הזמן, 25-27/7/2000
39	ציור 29: שינוי ה-TOC לאורך הזמן, 5-8/8/2000
39	ציור 30: שינוי בליעת UV, 5-8/8/2000
40	ציור 31: שינוי TPC, 5/8/2000
40	ציור 32: שינוי פוטנציאל ζ לאורך הניסוי 5-8/8/2000

- 41 ציור 33 : החומר המרחף לאורך הנחל, דיגום רציף, נובמבר '99
- 43 ציור 34 : שינויים בריכוזי החלקיקים לאורך היום הראשון לאורך העמודה, שבע טחנות
- 45 ציור 35 : עכירות שארייתית ו-TPC שארייתי לאורך הניסוי, עומק 30 ס"מ, שבע טחנות
- 46 ציור 36 : TPC לעומת TSS, VSS, בעומק 30 ס"מ, שבע טחנות
- 48 ציור 37 : ריכוז החלקיקים ובליעת UV, שבע טחנות
- 51 ציור 38 : התנהגות ה-PSD לפי משוואה מעריכית, שבע טחנות
- 52 ציור 39 : שינוי התפלגות גודל החלקיקים לאורך הזמן, שבע טחנות

רשימת טבלאות

- 27 טבלה 1 : נתוני המוצקים המרחפים והעכירות לאורך הנחל ובמקורותיו.
- 28 טבלה 2 : נתוני התחלת הניסוי באבו רבאח
- 29 טבלה 3 : נתוני התחלת הניסוי, תע"ש +3000
- 31 טבלה 4 : נתוני התחלת ניסוי בשבע טחנות
- 32 טבלה 5 : נתוני התחלת הניסוי במורד איילון
- 34 טבלה 6 : נתוני התחלה, שבע טחנות
- 36 טבלה 7 : נתונים מדגימות מים שונות במהלך הניסוי, שבע טחנות
- 36 טבלה 8 : נתוני חומר אורגני בתחנות אבו רבאח ושבע טחנות
- 44 טבלה 9 : PSD בעומקים 90-120 ס"מ בזמן שיא ריכוז חלקיקים, שבע טחנות
- 49 טבלה 10 : חישוב מהירויות שיקוע עבור חלקיקים בגדלים שונים, מינרליים ואורגניים
- 50 טבלה 11 : מספר התנגשויות לשניה, בין חלקיקים בפרקציות משמעותיות

רשימת נספחים

- נספח 1. תוצאות המשך הדיגום
- נספח 2. שינוי PSD לאורך זמן השיקוע, התחנה שבע טחנות, מאי 2000
- נספח 3. תרגיל במאזן מסה
- נספח 4. השוואת עכירות ל-TPC בניסויי שיקוע
- נספח 5. אופטיקת אצות

רשימת קיצורים

TPC = Total Particle Count
 PC = Particle Count
 PSD = Particle Size Distribution
 TSS = Total Suspended Solids
 VSS = Volatile Suspended Solids
 TOC = Total Organic Carbon
 UV = Ultra Violet

תוכן עניינים

עמוד	סעיף
1	1. מבוא
1	1.1 רקע
1	1.2 מטרת המחקר
2	2. סקר ספרות
2	2.1 חלקיקים קולואידים - הגדרות
4	2.2 קואגולציה ופלוקולציה
4	2.2.1 מנגנוני קואגולציה
5	2.2.2 גורמים המשפיעים על קואגולציה
7	2.3 אצות כחלקיקים
7	2.3.1 שיקוע אצות
8	2.3.2 שיקוע משותף לאצות ולחלקיקים
10	2.4 נוכחות חומר אורגני
10	2.4.1 הגדרה
10	2.4.2 מקור
10	2.4.3 פלוקולציה בנוכחות NOM
10	2.4.4 הרחקה של NOM
10	2.5 הסעה ושיקוע
11	2.5.1 תהליכי הסעת חלקיקים בזורם
11	2.5.2 סוגי שיקוע שונים
13	2.5.3 מסקנות מניסויי שיקוע
13	2.5.4 מודלים מתמטיים לתאור השיקוע
17	2.5.5 עריכת ניסויי שיקוע
19	2.6 סכום סקר הספרות
23	3. שיטות וחומרים
23	3.1 מדידות (בנוסף לאלו שפורטו בדו"ח הקודם)
23	3.2 ניסויי השיקוע
25	3.3 מעקב אחר שיקוע חומר אורגני
25	3.4 אופטיקת אצות
27	4. תוצאות
27	4.1 אפיון רציף של הנחל
28	4.2 ניסויי שיקוע – חלק א'
34	4.3 תוצאות ניסויי שיקוע – חלק ב'
36	4.4 מעקב אחר שיקוע חומר אורגני

עמוד	סעיף
41	5. דיון
41	5.1 אפיון רציף של הנחל
43	5.3 ניסויי השיקוע- חלק ב'
43	5.3.1 נתוני מי מקור
43	5.3.2 פלוקטואציות ריכוזי החלקיקים
44	5.3.3 נתונים השוואתיים
44	א. עכירות ו-TPC
46	ב. מוצקים מרחפים וריכוז חלקיקים למ"ל
46	ג. מוצקים נדיפים ורמת ההגבה
47	ד. נתוני דגימות מים משלושה עומקים רצופים
47	ה. נוכחות חומר אורגני כתלות בסינון
48	ו. השפעת החומר האורגני על יציבות החלקיקים
48	5.3.4 שימוש במודלים מתמטיים
48	א. חישוב מהירות השיקוע
50	ב. מספר התנגשויות
50	ג. התפלגות גודל החלקיקים ע"פ ביטוי מעריכי
52	ד. מאזן מסה
53	5.5 חקר קרקעית הירקון בראשות פרופ' אבנימלך
54	5.6 דיון כולל וסיכום
54	5.6.1 התנודות החריפות בריכוזי החלקי במהלך השיקוע
55	5.6.2 תהליכי ההסעה וההפתתה לאורך הנחל
56	5.6.3 השפעת האצות על החלקיקים בנחל
56	5.6.4 השפעת החומר האורגני על החלקיקים בנחל
57	5.6.5 ביצוע ניסויי שיקוע
57	5.6.6 השלכות המחקר לגבי אפשרויות הטיפול במים
59	5.6.7 תאור איכותי של מערכת נחל הירקון
60	6. מסקנות והמלצות להמשך המחקר
60	6.1 מסקנות (כולל מסקנות מדו"ח קודם)
61	6.2 המלצות להמשך מחקר
62	רשימת ספרות נספחים

1. מבוא

1.1 רקע

נחל הירקון יכול לשמש כמודל לנחלים רבים בארץ ובעולם, שכן נחלים רבים משמשים מחד גיסא בתפקידים המסורתי כערוץ מים התומך במערכת אקולוגית שלמה על כל היבטיה ומורכבותה; מאידך גיסא משמשים נחלים בעולם המתפתח והצפוף כערוצים להובלת קולחין (במקרה הטוב, במקרה הרע- שפכים). בישראל, השפכים הביתיים ואף התעשייתיים הם הגורם המשמעותי ביותר בקביעת אופי מי נחלי החוף, עם הצריכה הכמעט מוחלטת של נביעות המים השפירים.

עם השתנות הזורם בנחל ממים עיליים שפירים למי קולחין, משתנים פרמטרים רבים המאפיינים את הזרימה, ואת החומר המוסע בנחל, אולם אין להתייחס לזורם לפי הפרמטרים הידועים של מי הקולחין, שכן מתרחשים בהם שינויים עם הזרימה בערוץ הנחל הטבעי (הן בשינוי מרכיבים כמו אוכלוסיית החלקיקים והמיקרואורגניזמים והן בשינוי פרמטרים כגון חמצן מומס ורמת הגבה כחלק מתהליך הטיהור העצמי של הנחל). כדי לעמוד על אופיו השונה של הנחל "המופרעי" ע"י ההתערבות האנתרופוגנית, יש לזהות את מרכיביו, אפיונו ואת התהליכים המתרחשים בו.

מערכת החלקיקים המרחפים במי הנחל מושתתת על קשרי גומלין בין המערכת הביולוגית, המינרלית, החומר המומס, מדיום הזורם והתנאים הפיזיקליים הקבועים והמשתנים שלו (טמפרטורה, רמת הגבה), ועוד. בדיון המתקיים לגבי תהליכים הפועלים על חלקיקים כגון קואגולציה, שיקוע ובכלל הפרדת מוצקים מנוזלים, קיימת התייחסות רבה לתהליכים המונעים ע"י אמצעים כימיים או פיזיקליים (למשל: מפתיתים) המזרזים את תהליכי השיקוע ומגבירים אותם. למעשה, העקרונות הפועלים על המערכת הטבעית של חומר מרחף במי נחל, הם זהים במקרים רבים וניתן לבחון באמצעותם מערכת חלקיקית כלשהי.

דו"ח שנת המחקר הקודמת אפיין נקודות מייצגות לאורך הנחל לפי פרמטרים סביבתיים כללים, ובחן ביתר פירוט את אוכלוסיית החלקיקים לאורך הנחל ולאורך השנה, מבחינת פרמטרים כמו הרכב, צורה, גודל, ועוד. שנת המחקר הנוכחית, מתעמקת בתהליכי השיקוע וההסעה הטבעיים המתרחשים בנחל.

1.2 מטרת המחקר

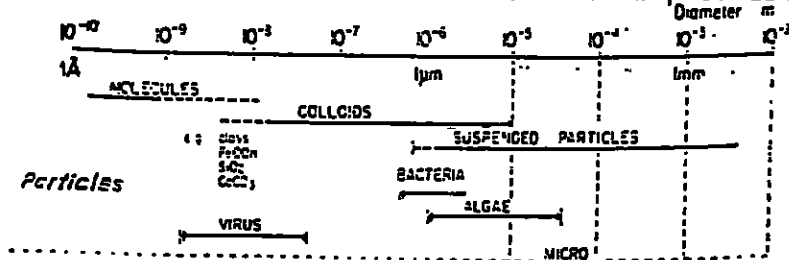
מטרת המחקר בשנה זו היתה לבחון את תהליכי השיקוע וההסעה הטבעיים המתרחשים בנחל. בחינת השיקוע כוללת מעקב אחר קצבי השיקוע בתחנות השונות, שינוי התפלגות החלקיקים לאורך הזמן ולאורך העמודה, מהות החומר (אורגני/מינרלי) ונתונים נוספים המסייעים בהערכת פוטנציאל השיקוע הטבעי בתחנות המייצגות לאורך הנחל והגורמים המשפיעים על פוטנציאל זה. כמו כן נבחנו מודלים מתמטיים קיימים, שפותחו לשם תאור תהליכים במים עיליים טבעיים/ מי קולחין ונבדקת תקפותם בנחל "המופרעי".

2. סקר ספרות

הקדמה - החומר המרחף במי הנחל

אחד המדדים החשובים ביותר בהערכת מצבו של נחל הוא מדד המוצקים המרחפים. חומר סחף זה מוגדר כפרקציה דקת הגרגר ביותר מתוך כל חומר הסחף, ומורכבת מחלקיקים שמהירות השיקוע שלהם כה נמוכה, שהם מוסעים במהירות כמעט זהה לזו של המדיום הזורם, כך שאפשרות לשיקועם מתקיימת רק בהפחתה ניכרת במהירות הזרימה (Knighton, 1998). החומר המרחף יכול להיות אורגני או מינרלי. בדו"ח הקודם הייתה ההתייחסות לחומר המרחף בראייה מאקרוסקופית. בדו"ח הנוכחי הראייה היא מיקרוסקופית.

טווח הגדלים של החלקיקים רחב כפי שניתן לראות בציור 1:



ציור 1: טווח הגדלים של החלקיקים (Amirtharajah and O'Melia, 1990).

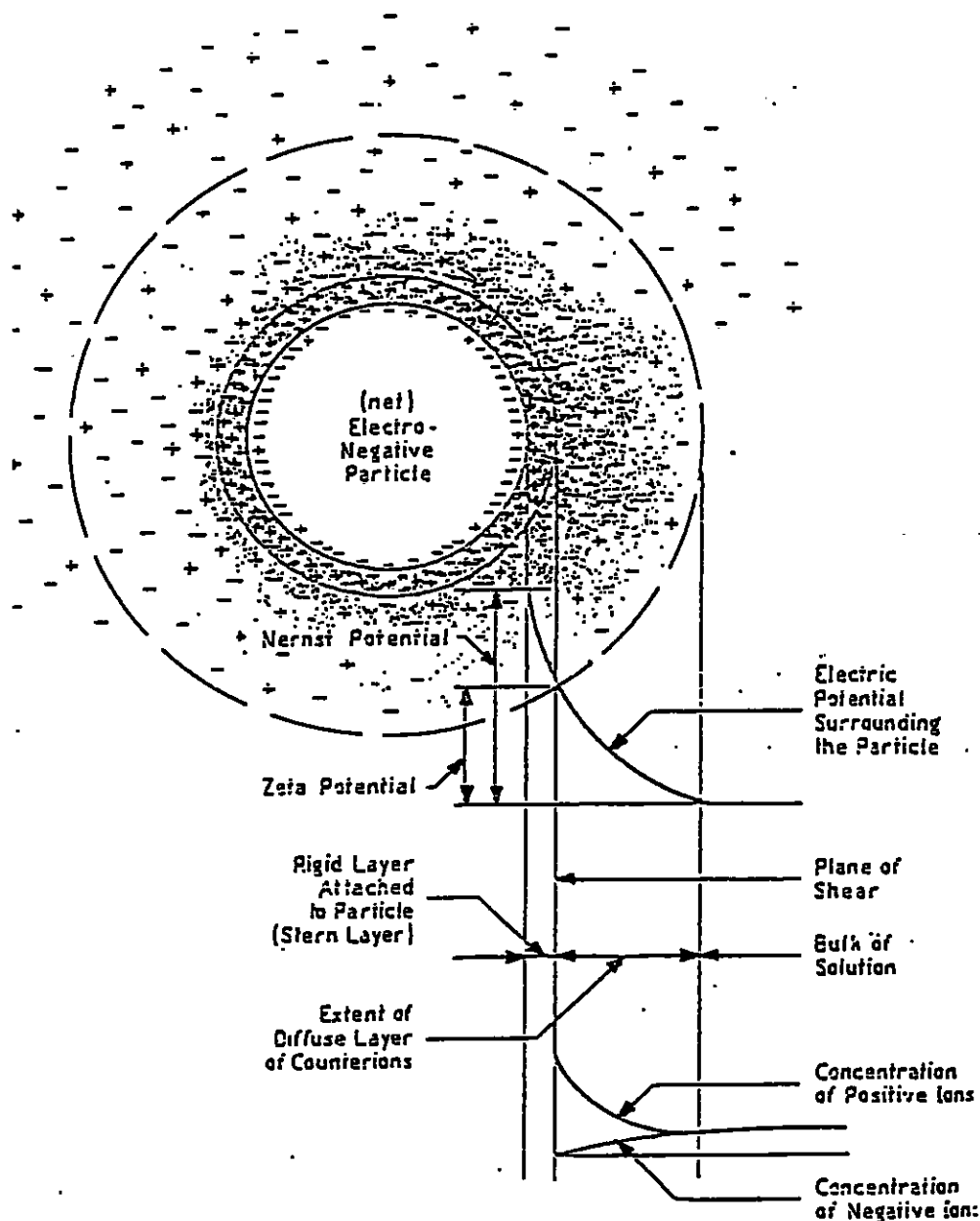
בדיון בתהליכים הפועלים על חלקיקים כגון קואגולציה, שיקוע ובכלל הפרדת מוצקים מנוזלים, קיימת התייחסות רבה לתהליכים המונעים ע"י אמצעים כימיים או פיזיקליים (למשל: מפתיתים) המזרזים את תהליכי השיקוע ומגבירים אותם. למעשה התהליכים הפועלים על חלקיקים, בין אם הם טבעיים ובין אם הם מונעים ע"י אמצעים מלאכותיים, הם זהים במהותם ומושתתים על אותם עקרונות כימו-פיזיקליים. העבודה שנעשתה בשנת המחקר האחרונה הוקדשה למעקב אחר התהליכים המתרחשים במערכת הטבעית (הנחל) ולכן הדיון המובא להלן מציג (בדרך כלל) את העקרונות והמנגנונים המתרחשים במערכת שיקוע כלשהי ותקפים למערכת שיקוע טבעי.

2.1 חלקיקים קולואידיים - הגדרות

בטינול במים עיקר הדגש מופנה לפרקציה הקולואידית, משום הדומיננטיות שלה מחד ומשום הקושי בהרחקתה מאידך. השימוש במונח "קולואיד" (colloid) מיוחס לרוב לכל אותם חלקיקים בטווח הגדלים המוגדר בציור (מיקרו מטר ומטה) וכולל חלקיקים מינרליים, ביולוגיים ואורגניים שאינם ביולוגיים. התייחסות לחלקיק כאל קולואיד יכולה להיות מוצדקת גם כאשר גודלו מעל מיקרומטר, למשל אצות שונות בעלות תכונות קולואידליות.

קיימים קולואידיים בעלי יציבות אין סופית, שהם אנרגטית או תרמודינמית יציבים. הם נקראים reversible colloids. קולואידיים המוגדרים irreversible יחיו בלתי יציבים תרמודינמית ונכונים להתלכדות עם חלקיקים אחרים. ניתן להגדיר בתוך קבוצת החלקיקים ה- irreversible חלוקה נוספת ליציבים ובלתי יציבים, אולם חלוקה זו מבוססת על הקינטיקה של ערעור היציבות בניגוד ליציבות האנרגטית שהוזכרה לפני כן (Amirtharajah and O'Melia, 1990).

חלקיקים קולואידים יהיו בדרך כלל טעונים שלילית, אולם תמיסה קולואידית לא תהיה בעלת סך מטען שלילי, שכן המערכת המימית תביא לאיזון המטען בזכות יונים שונים במים (ציור 2).



ציור 2: הצגה סכמטית של הקולואיד הטעון שלילית וסביבותיו (Amirtharajah and O'Melia, 1990).

להלן המושגים העיקריים המופיעים בציור:

השכבה הדיפוזיבית היא ענן היונים שימצא סביב חלקיק קולואידי הטעון שלילית. עיקר היונים באותו "ענן" בעלי מטען הופכי לזה של החלקיק, ושכבה צפופה ביותר של יונים חיוביים תמצא בצמוד לפני השטח של החלקיק (שכבת שטרן). פוטנציאל ζ מתיחס לתנועה של חלקיקים

טעונים, "electrophoretic mobility", והוא תלוי בפוטנציאל בפני שטח החלקיק (פוטנציאל נרנסט) ובעובי השכבה החשמלית הכפולה.

תכונות אופייניות של חלקיקים (צורה והרכב כימי בפני השטח) משתנות בהתאם למקורם (Adin, 1999). קולחי מאגר שפכים יהיו בעלי מגוון חלקיקים, בד"כ בעלי צורה גילטינית ואופיינו ע"י הרכב פני שטח צורני (Si), בעוד שקולחי בוצה משופעלת יהיו בעלי צורה אחידה למדי וסגלגלה ונשלטים ע"י Ca, Si, Cl בפני השטח שלהם. קולחי בריכות חימצון וליטוש בעיקרם נשלטים בהרכבם הכימי ע"י P, K, Ca - אפיון כימי המתאים לסביבות המאוכלסות באצות.

הכוחות הפועלים על חלקיק בזורם הינם כח הכובד, הפועל כלפי מטה; כח הגרר (המבטא את החיכוך עם הזורם) הפועל כלפי מעלה; כח הציפה הפועל כלפי מעלה (תלוי בהפרש הצפיפויות).

ציור 3 מציג סכמה של הכוחות: כח הגרר



ציור 3: סכמת הכוחות הפועלים על חלקיק בזורם.

2.2 קואגולציה ופלוקולציה

אגרגציה של חלקיקים קולואידליים מכילה שני שלבים נפרדים: (1) הסעת חלקיקים המביאה למגע בין חלקיקים (1-2) עירעור יציבות חלקיקים המאפשר חבור בעת מגע (Weber, 1972).

שני מנגנונים חוברים לשם שיקוע פלוקולנטי של קולואידים בתמיסה: בשלב הראשון יש צורך בערעור היציבות של החלקיק ע"י קואגולציה, כלומר ע"י הפחתת סך כוחות הדחייה הפועלים בין החלקיקים. המנגנון השני, פלוקולציה, הוא עצם יצירת הצבר מחלקיקים שעורערו (Viessman and Hammer, 1998) יצירת הצבר היא בזכות כוחות המשיכה (ואן דר ואלס, קשרי מימן) המתחזקים עם התקרבות החלקיקים אחד לשני.

2.2.1 מנגנוני קואגולציה

ארבע אופנים שונים יכולים לתרום לקואגולציה (Amirtharajah and O'Melia, 1990):

א. דחיסת השכבה החשמלית הכפולה; ב. נטרול מטען; ג. סחיפת; ד. ספיחה וגישור.

א. דחיסת השכבה החשמלית הכפולה תתרחש בזכות נוכחותם של מלחים המוגדרים "indifferent electrolytes" משום שהם משמשים כנקודות מטען בלבד, ללא אפיון כימי. חוק שולץ-הארדי (Schulze-Hardy rule) אומר כי יש צורך במטען הופכי לזה של הקולואיד וכי ככל שמטען היון החופכי גדול יותר כך השפעתו לדחיסת השכבה החשמלית רבה יותר. כך למשל כדי לערער יציבותו של קולואיד טעון שלילית יש אפשרות להשתמש ביונים בעלי מטען שונה Na^+ , Ca^{2+} , Al^{3+} ביחס הבא: 10^{-3} : 10^{-2} : 1 בהתאמה. במערכת טבעית מתקיים מנגנון כזה כאשר נחל זורם לים, בו

החוזק היוני רב יותר ומביא לדחיסת השכבה החשמלית והתאפשרות תנאים טובים יותר לקואגולציה ופלוקולציה.

ב. נטרול מטען מושג בזכות תהליכים כימיים של ספיחת צורונים בעלי מטען הופכי לחלקיק ובכך נטרול מטענו. נטרול המטען משמעו נטרול כוחות הדחייה החשמלית ואפשרו התקרבות החלקיקים במים. פרמטרים חשובים בהקשר זה הם תכונות הצורון (מבנה, הרכב) וריכוזו.

ג. סחיפה (sweep coagulation) של משקעים המורכבים ממלחי מתכת והידרוקסידים (למשל: $Al(OH)_3$) תביא ללכידתם של קולואידים ושיקועם יחדיו עם המשקעים הנ"ל. מנגנון זה יותר סביר שיתקיים בתנאים של הפתתה כימית, בה מוספים מלחי מתכת.

ד. ספיחה של פולימרים בעלי אתרי ספיחה רבים על יותר מחלקיק אחד מאפשרת גישור בין החלקיקים ויצירת צבר בר שיקוע. נוכחות עודפת של פולימרים אלו תביא לתוצאות ההפוכות של יצירת יציבות מחדש משום רווית פני השטח. במערכת טבעית מוכרים ביופלוקולנטים (פוליסאכרידים חוץ תאיים). התייחסות רחבה יותר תופיע בהמשך.

2.2.2 גורמים המשפיעים על קואגולציה

תהליך הקואגולציה הינו תהליך מורכב המכיל גורמים רבים (חלקם סביבתיים וחלקם יחודיים לחלקיקים בתמיסה) המשפיעים באופנים שונים על מהלכו (Amirtharajah and O'Melia, 1990):
רמת ההגבה משפיעה על מטען החלקיק משום הגבה בין קבוצות בפני שטח החלקיק עם יוני מימן בתמיסה או אף עם מומסים אחרים. מטען החלקיק משפיע על דחייתו מחלקיקים אחרים.
ריכוז קולואידים (עכירות) גבוה מאפשר הסתברות גבוהה יותר של התנגשויות חלקיקים, שיכול להסתיים בקישור כימי ביניהם.

חומר אורגני בא לכדי ביטוי במדידות ה-TOC או ה-DOC, בצבע ואף באמצעים אחרים. חומר אורגני המופיע בצורה של תרכובות הומיות, הוא בעל מטען שלילי ומביא לייצוב החלקיקים (stabilization) ולצורך בערעור משמעותי יותר של יציבות החלקיקים.

אניונים וקטיונים בתמיסה יכולים להשפיע באופנים שונים: אניונים כמו סולפט עלולים להפריע לתהליך היפוך מטען. קטיונים זו ערכיים כמו Ca^{2+} מסייעים בערעור יציבות קולואידיים ע"י דחיסת השכבה החשמלית הכפולה.

השפעת הערבוב באה לידי ביטוי במערבוליות המעלה את הסתברות התנגשות החלקיקים, המחושבים תוך שימוש בפרמטר גרדיאנט המהירות G.

פוטנציאל ζ הוזכר לפני כן ומהווה גורם חשוב בהערכת יציבות החלקיקים. פוטנציאל ζ של מים טבעיים הוא בדייק בטווח 20-40mV. ככל שפוטנציאל ζ מתקרב ל-0 mV הוא מעיד על דחיסת השכבה החשמלית ועל עירעור היציבות.

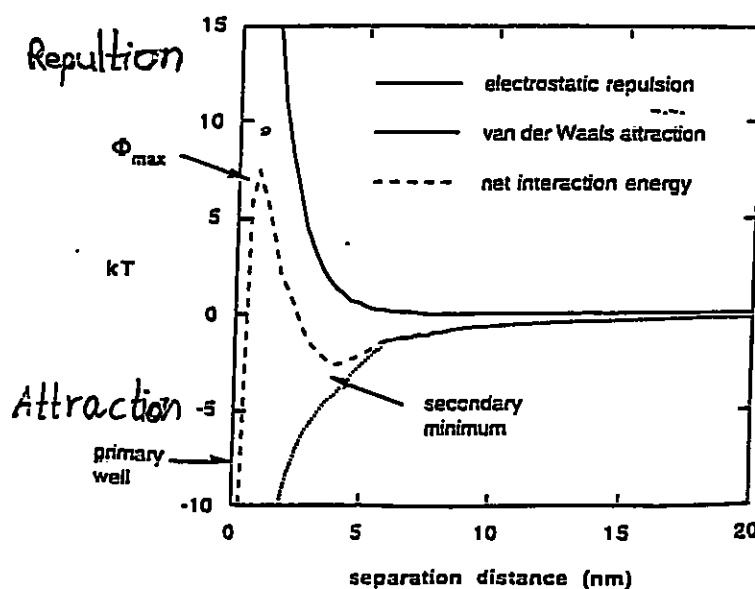
טמפרטורה משפיעה באופנים שונים על הקואגולציה: הטמפרטורה משפיעה על צמיגות הנוזל; מביאה לשינוי מבני של אגרגטים המתבטא בגודלם; משפיעה על האנרגיה החופשית של תרכובות אורגניות הספוחות אל פני שטח של חלקיקים ועל אנרגיית המים, דבר היכול להשפיע על תנועה דיפוזיבית.

מנת הקואגולנט בתהליכים טבעיים התייחסות היא לנוכחות קואגולנטים טבעיים, כגון ביופלוקולנטים עליהם יורחב הדיון בהמשך. בהפתתה לא טבעית, אלא מכוונת, יש חשיבות למנת הקואגולנט, בהתאם לסוג הקואגולנט (בדייק השימוש באלום או בברזל כלוריד). באופן כללי,

בשימוש במפתיתים כימיים יש לכל אחד מהגורמים שנמנו לעיל השפעה על הקואגולציה, שלא תפורט כאן.

סולבציה (מיום) של החלקיק - Weber (1972) מעלה את חשיבות מידת הסולווציה (solvation) של החלקיק במים (היות החלקיק מוקף ומקושר עם מולקולות מים), המוגדרת כהידרופיליות או הידרופוביות, אשר משפיעה על נכונות החלקיק להתקשר עם חלקיק אחר. חלקיק הדרופילי, המקושר כימית עם שכבת מולקולות מים, יתקשה ביצירת אגרגטים עם חלקיקים אחרים. גודל החלקיק משפיע על גורמים רבים, בין השאר על שקול הכוחות הפועל על החלקיק (O'Melia et al., 1996) (ציור 4): קולואידים תת מיקרוניים יושפעו באופן משמעותי מתנועה תרמלית ויאופיינו ע"י הסעה מסוג דיפוזייה בראונית (כפי שהוזכרה לפני כן). קולואידים גדולים, בני כמיקרון יישלטו ע"י כח הגרר, שיעפיל על הדיפוזיה. חלקיקים בני מספר מיקרונים ומעלה יושפעו בעיקר מכח הכובד. כמו כן, לגודל החלקיק השפעה על האינטראקציות הכימיות של החלקיק, ע"י השפעה על אנרגית הדחייה החשמלית ואנרגית המשיכה ואן דר וואלס, ע"פ תאוריית DLVO.

תאוריית ה-DLVO גורסת כי שקול כוחות הדחייה החשמלית והמשיכה (ואן דר ואלס) הינו פונקציה של המרחק בין החלקיקים. אותו שקול כוחות מאופיין בסף אנרגטי גבוה אותו יש לעבור לפני הגעה למרחק המאפשר דומיננטיות כוחות ואן דר ואלס (primary minimum). כמו כן קיים אזור מצומצם של נטו כוחות משיכה (secondary minimum) הקודם לסף האנרגטי של הדחייה. באזור זה התקשרויות עלולות להיות הפיכות ולהביא לחזרת החלקיק לתמיסה במקום הישארותו בצבר. אפיוני תחום זה ע"פ O'Melia et al.: 1. ייתכנות חיזוי תאורטי של קינטיקת אגרגציה ושיקוע תחת תנאים לא רצויים (כאלו הקיימים במערכות טבעיות); 2. רברסביליות ההתקשרות בתחום הנ"ל יכולה להסביר תופעות של פרוק צברים (דיסאגרגציה) שנצפו במים עיליים ותחתיים. משמעות הדבר היא כי יש לבחון מחדש את ההנחה כי הסתברויות הקישור הכימי בין החלקיקים המתנגשים (פרמטר α) קבועות, המיוחסת לתחום של ה-primary minimum וככל הנראה משתנות במהלך תהליך התקשרות הפיך.



ציור 4: הכוחות הפועלים על חלקיק, כפונקציה של המרחק (O'Melia et al., 1996).

2.3 אצות כחלקיקים

2.3.1 שיקוע אצות

גורמים שונים משפיעים על מהירות שיקוע של אצה - חלקם סביבתיים וחלקם תלויים בנתוני תא האצה עצמו (כהן-נח, 1982):

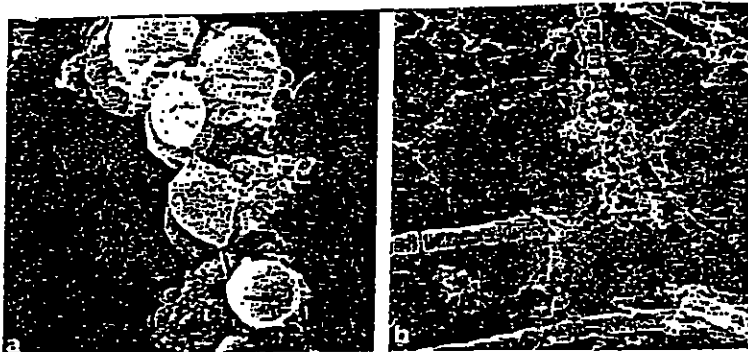
- טמפרטורת הסביבה משפיעה על צמיגות המים - טמפרטורה נמוכה תביא לצמיגות גבוהה בה מהירות השקיעה נמוכה וכן הטמפרטורה משפיעה על המצב הפיסיולוגי של התאים;
- עוצמת האור עלולה להשפיע ברמה ההתנהגותית על ה"פוטוטקסיס" של האצה;
- גודל וצורת האצה, להם חשיבות מרובה, בהתייחסות לאצה כאל חלקיק;
- רמת החמצן המומס במים משפיעה על המצב המטאבולי של התאים;
- נוכחות נוטריינטים משפיעה על מהירות השיקוע באופן עקיף ע"י השפעה ישירה על קצב חלוקה וגודל התאים;

- המצב הפיסיולוגי הכללי של האצה משפיע גם הוא על מהירות שקיעתה. מצב זה כולל פרמטרים של גיל התא ושלב החיים של האצה (גידול או רבייה): ככל שהאצה "זקנה" יותר, הסרתה מהמים תהיה מהירה יותר וכך גם לגבי תאי אצות בשלב הסטציונרי (לעומת שלב הגידול האקספוננציאלי) תנאים סביבתיים מוסיפים ומשפיעים גם הם - צפיפות המים, מליחותם ועוד.

סדרת נסיונות (כהן-נח, 1982) במיני האצות *Dunaliella* ו-*Navicula*, הראו כי הגורמים הראשוניים במעלה בקביעת קצב שיקוע אצות הם אותם גורמים המשפיעים על חלקיקים לא ביולוגיים, בהתאם לחוק Stokes: תאים גדולים שוקעים מהר יותר מתאים קטנים וכן תאים בעלי ממדים זהים אך צורה שונה ישקעו כפונקציה של הכדוריות, לפי הכלל כי עבור כדוריות גבוהה-קצב שיקוע מהיר יותר. קיבוע בפורמלין לשם ניטרול השימוש בשוטונים הביא לתוצאות דומות כשל שיקוע אצות חיות, דבר שהוביל למחשבה כי השוטונים מהווים יתרון בהאטת השיקוע ע"י יצירת מבנה מוארך ופחות כדורי ולא מהווים השפעה ישירה על כושר הרחיפה. תנאי הסביבה להם ביטוי בחוק Stokes - צמיגות המים וצפיפותם הוכחו גם הם בניסויים הני"ל: נצפתה שקיעה איטית יותר במדיום בעל צפיפות גבוהה יותר וכך גם במדיום בעל צמיגות גבוהה יותר. השפעת ה"פוטוטקסיס" הוטלה בספק לאחר שנמצא כי ניסויים באור ובחושך הניבו תוצאות דומות.

2.3.2 שיקוע משותף לאצות ולחלקיקים

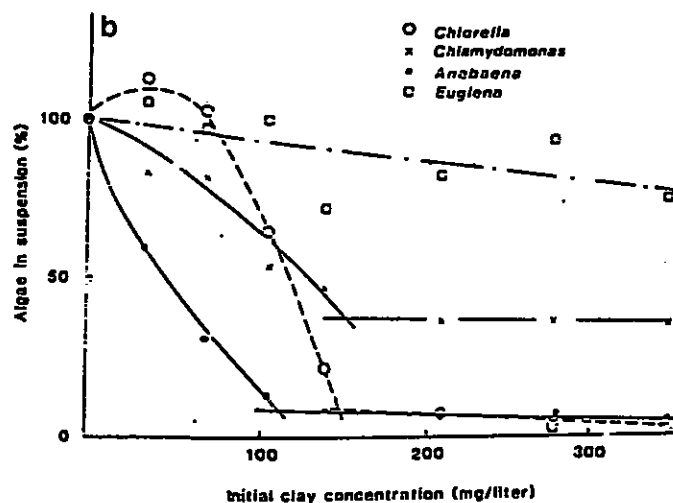
שיקוע אצות יחדיו עם חלקיקים יכול להתרחש בזכות פולימרים חוץ תאיים (ציור 5), בעיקר פוליסכרידים, אותם האצות מפרישות.



ציור 5: a. צבר חרסית - *Chlamydomonas* (x1470), b. צבר חרסית - *Anabaena* (x1200) (Avnimelech et al., 1982).

Busch and Stumm (1968), מיצו חומרים אניוניים חוץ תאיים מתרבית שהופתתה בבוצה משופעלת. פולימרים אלו מצטברים בשלבי הגידול של הפחתת קצב הגידול או בשלב האנדוגני. נמצא כי פולימרים אלו הביאו לעירעור יציבות הן של תרחיף מיקרואורגניזמים והן של תרחיף קולואידים קווארציים. הסבר לפלוקולציה הפולימרים הכוללים קבוצות פונקציונליות אניוניות יחדיו עם חלקיקים טעונים שלילית הוא ספיחה באתרים פעילים בפני השטח של החלקיקים וגישור. מנגנון הגישור בא לידי ביטוי בקשר הליניארי שנמצא בין ריכוז הפולימר לבין ריכוז הקולואידים (פני השטח הזמינים) בתרחיף. הסבר שהוצע לקישור הכימי הוא קשרי מימן.

ניסויי מעבדה (Avnimelech et al., 1982) עקבו אחר אגרציה של ארבע מיני אצות שונים עם חרסית Bentonite בעלת חלקיקים הקטנים מ- $0.2\mu\text{m}$, שהוספה לתרחיף האצות במינונים שונים, בנוכחות אלקטרוליטים CaCl_2 ו- NaCl . מיני האצות היו: *Euglena*, *Anabaena*, *Chlamydomonas*, *Chlorella*. מידת האגרציה השתנתה בקרב מיני האצות השונים: *Anabaena* הגיבה באגרציה המשמעותית ביותר- מחצית האצות שקעו כבר עם תוספת החרסית הקטנה ביותר; *Chlamydomonas* נטו לפלוקולציה, אך עדיין נותרו בריכוזים לא מועטים בתמיסה; *Chlorella* ביצעה פלוקולציה בריכוזי חרסית גבוהים ובנוכחות ריכוזי אלקטרוליט "קריטיים"; *Euglena* הראתה השפעה מועטה. הסדימנטציה הושלמה לאחר 3 שעות. נמצא כי הפלוקולציה שהתרחשה בשלושת המינים הראשונים נחלקת לשתי פאזות: פאזה ראשונה בריכוזים התחלתיים נמוכים של חרסית, בה כל עליה בריכוז החרסית מביאה להגברה משמעותית של האגרציה, דבר המתבטא בירידה גדולה בשיעור האצות בתרחיף. ופאזה שניה בה ריכוזי חרסית גבוהים יותר, מביאים לירידה מועטה בלבד בריכוזי האצות בתרחיף. נקודת המעבר בין שתי הפאזות מייצגת את היחס המקסימלי של חרסית לתאי אצות האפשרית בפתיים הנוצרים. הציור הבא מציג את הפלוקולציה הדו שלבית עבור ריכוז מיני אצות שונים בעומק 6 ס"מ לאחר 120 דקות שיקוע כתלות בריכוזי חרסית התחלתיים:



ציור 6: פלוקולציה דו שלבית של חרסיות ואצות (Avnimelech et al., 1982).

במחקר אחר (Avnimelech and Menzel, 1984) נבדקו תהליכים אלו בתנאי השדה (באוקלהומה, ארה"ב). שני זוגות של בריכות מים עיליים עכורים הממוקמות בקירוב, שומשו בניסוי, כאשר לבריכה אחת מכל זוג הוספו חומרי דישון (חנקן וזרחן) והשניה נותרה בתנאי הטבעיים, כבריכת בקרה. ערכי העכירות הראשוניים היו גבוהים למדי: בזוג בריכות אחד נעו הערכים סביב 90 NTU ובזוג השני העכירות הראשונית היתה בסביבות 150-180 NTU. בשני הזוגות חומרי הדישון הביאו לפריחת אצות, שלאחריה ירדה עכירות הבריכה (20NTU ואף למטה מזה), הורחקו החלקיקים השונים ואף הנוטריינטים.

הוספת חומרי דישון למים עכורים נוגדת את שיטות הממשק הקונבנציונליות של מאגרי מים, מתוך חשש לאאוטרופיקציה של גוף המים. הבעייתיות הזו נפתרת לדעת המחברים, בזכות העובדה שבריכות בעלות עכירות קבועה, כמעט תמיד נטולות נוטריינטים שיכולים לתמוך בפריחת אצות. כאשר מוספים נוטריינטים ומתרחשת פריחת אצות, יש לבקר את התהליך כך שזמן שהייתן בגוף המים יהיה קצר ולא יוסף חומר אורגני יותר מאשר זה שיוסר בעת שיקוע האצות עם החלקיקים, כך שלא יצטבר חומר אורגני במים.

נראה כי כל עוד ריכוז החרסית המרחפת במים גבוה, אצות יבצעו פלוקולציה עם החלקיקים וישקעו יחדיו, או לחילופין- העדר אצות במים יהווה תנאי אחד לקיום יציב של חלקיקים במים, בריכוז מלחים נמוך (Avnimelech and Menzel, 1984). יעילות פלוקולציית אצות-חרסית מתבטאת בריכוז האצות הנותר בתרחיף או ביחס של חרסית לאצות בפתיים, הרוויים בחרסית. פוטנציאל הפלוקולציה השונה נובע ככל הנראה מהרכב דפנות התא ותכונותיו, במידת ההפרשות ובהרכבן, בתנאים הפיזיולוגיים, בגיל תא האצה ועוד (Avnimelech et al., 1982).

נוכחות אלקטרוליטים משפיעה על פלוקולציה של מיקרואורגניזמים וחרסיות. ע"פ מכניזם הקטיונים הרב-ערכיים, צורונים אלו מהווים "גשרי קומפלקסים" בין שני חלקיקים טעונים שלילית (Santoro and Stotzky, 1967). במצב בו קיימים בתמיסה קטיונים חד ערכיים בריכוזים גבוהים, הם מפחיתים את הדחייה האלקטרוסטטית בין חלקיקים חרסיתיים טעונים שלילית ופולימרים אורגניים וכך מאפשרים להם להתקרב מספיק כדי שכוחות המשיכה ישפיעו ויוצרו קשרים (ואן דר ואלס או קשרי מימן) (Teot and Daniels, 1969).

להפתתת אצות-חלקיקים יש השפעות אקולוגיות ויש להיות מודעים להתערבות שכזו במערכת טבעית (Avnimelech et al., 1982): התוצר המיידית של הפתתת מרכיבי המים הטבעיים, הוא יצירת חלקיקים גדולים יותר, בעלי מהירות שיקוע גבוהה יותר. הדבר יוביל כמובן לצבירת חומר על הקרקעית, דבר שיכול להשפיע הן על המערכת הבנטונית והן על המערכת שבגוף המים: שיקוע האצות מוביל להורדת מיקום הנוטריינטים, הנצרכים ע"י האצות באזור הפוטוסינתטי; בע"ח הניזונים תוך סינון המים (filter feeders), יכולים להיות ניזונים מהאצות המופתתות ביתר קלות, שכן ההפתתת יוצרת צברים גדולים מספיק בכדי להיעצר בפילטר הביולוגי; סדימנטציה של אצות היא מכניזם סלקטיבי לצבירת מין אצות מופתת בקרקעית והישרדות מין לא מופתת בעמודת המים. הסלקטיביות יכולה לנבוע משוני טקסונומי פיזיולוגי; סלקטיביות נוספת הינה לגבי שלב

החיים של האצה – יתכן ומנגנון ההפתתה מהווה מנגנון בקרה להרחקת תאי אצות "זקנים" יותר ופעילים פחות; כך גם נמצא כי נטיית ההפתתה של מיקרואורגניזמים היא בשלב ה- declining growth ופאזת המוות, או כאשר האוכלוסיה נתונה בעקה כלשהיא ("stress").

2.4 נוכחות חומר אורגני

2.4.1 הגדרה

חומר אורגני טבעי (NOM) יכול להופיע כחלקיקים קולואידיים או כחומר מומס. חומר אורגני קולואידי כולל תרכובות מאקרו-מולקולות אורגניות כמו חומר הומי, פרוטאינים, וירוסים, בקטריה ואצות (Adin and Asano, 1998). חומרים הומיים הם פוליאלקטרוליטים אניוניים בעלי משקל מולקולרי נמוך עד בינוני. המטען שלהם נובע בעיקר מקבוצות קרבוקסיליות ופנוליות. הם כוללים מרכיבים ארומטיים ואליפטיים ויכולים להיות פעילי פני שטח. חלוקה פנימית תהיה לפרקציה עיקרית של חומצות פולביות שהן מסיסות יותר ולחומצות הומיות, מסיסות פחות. חומרים אלו יכולים לשרוד מאות שנים ויותר (Amirtharajah and O'Melia, 1990).

2.4.2 מקור

חומרים אורגניים ממקור טבעי יכולים להגזר ממקורות כמו אדמה, עצים וצמחייה נרקבת ונוצרים ע"י תהליכים ביולוגיים (Amirtharajah and O'Melia, 1990). חומר אורגני מופיע במים עיליים ונפוץ מאד בקולחין שניוניים ממתקני טיפול בשפכים (Adin and Asano, 1998; Narkis and Rebhun, 1996).

2.4.3 פלוקולציה בנוכחות NOM

Narkis and Rebhun (1996) בחנו את השפעת נוכחות החומר האורגני על פלוקולציה של מספר סוגי מים: מים עיליים בעלי עכירות טבעית, תרחיף חרסית בעלת נתונים ידועים ומי קולחין שניוניים. נמצא כי במים עיליים קיימת דרישה גבוהה לפלוקולנט, אולם, לאחר טיפול חמצון או מיצוי החומר האורגני ירדה הדרישה באופן משמעותי. במקרה של תרחיף החרסית, הדרישה לפלוקולנט גדלה באופן משמעותי כאשר הוסף לתרחיף חומר אורגני בצורת מומס ומאקרומולקולות. באשר לקולחין השניוניים, ניתן להניח כי נוכחות החומר האורגני שם הוא שהביא לדרישה הגבוהה לפלוקולנטים. השוואה בין הקולחין לבין תמיסת הקולחין (שהתקבלה לאחר צנטריפוגה של הקולחין) הביאה למסקנה שפרקצית החומר האורגני המומס היא שמביאה לדרישה הגבוהה של הפלוקולנט.

2.4.4 הרחקה של NOM

חומרים אורגניים עוברים קואגולציה טובה יותר בתנאים חומציים ($pH = 4.5-6$) שכן אז המטען האניוני של החומר האורגני נהיה פחות שלילי והמטען הקטיוני של פוליאלקטרוליטים סינתטיים נהיה יותר חיובי ונוצרים חלקיקי משקע של חומר אורגני ושל הקואגולנט. כמו כן נמצא קשר סטוכיומטרי ישיר בין ריכוז החומר האורגני למנת הקואגולנט הנדרש לשם הסרתו (Amirtharajah and O'Melia, 1990). הקואגולנט הקטיוני מגיב באופן מועדף עם החומר האורגני בתמיסה ולכן מדוכאת הראקציה בין החלקיקים לבין הקואגולנט ונדרשות מנות גבוהות שלו במים עכורים המכילים חומר אורגני (Narkis and Rebhun, 1996). בהיווצרות חלקיקי משקע של החומר האורגני והקואגולנט, הסרתם ע"י שיקוע או סינון טובה יותר בפוטנציאל ζ נמוך או קרוב ל-0 (Amirtharajah and O'Melia, 1990).

Semmens and Ayers (1985) מצאו כי קואגולציה אינה דרך יעילה להסרת תרכובות אורגניות בעלות משקל מולקולרי נמוך אולם יעילה בהסרת תרכובות אורגניות בעלות משקל מולקולרי בינוני וגבוה. הדבר נבדק הן במים טבעיים של נהר המיסיסיפי והן בתמיסה "סינתטית". בשני המקרים נעשה מעקב אחר ארבע תרכובות אורגניות בעלות משקל מולקולרי נמוך (Octanoic acid, Salicylic acid, Benzoic, Phenol) שנבחרו משום שהן מייצגות תרכובות שיכולות להימצא במים משום פירוק של חומרים אורגניים מורכבים יותר והן משום דמיון מבני שלהן לתרכובות פולביות. כמו כן נמצא כי נוכחות חומר אורגני טבעי אחר במים הורידה מעילות הסרת התרכובות בהיותו מתחרה על המפתיתים.

מחקר שנערך על מי קולחין של ארבע מתקני טיפול שונים (Dickenson and Amy, 1999) בחן טיפולים מתקדמים שונים. נמצא כי הצלחת הטיפולים המתקדמים בהסרת/ פירוק ה- NOM תלויה באופיו: אולטרא-פילטראציה וספיחה ע"י פחם פעיל הסירו באופן מועדף NOM שאינו פולארי, בעוד ש- NOM פולארי הורחק באופן מועדף ע"י אוזונציה וטיפול ביולוגי.

2.5 הסעה ושיקוע

2.5.1 תהליכי הסעת חלקיקים בזורם

התנהגות החלקיקים בזורם להיות מושפעת מפעולת כוחות שונים ועל כן להתאפיין באורח שונה: דיפוזיית Brown (פלוקולציה פריקינטית) תנועה אקראית של החלקיקים, הנובעת מהתנגשויותיהם עם מולקולות המים. האנרגיה התרמית של מולקולות המים שולטת במנגנון התנועה הדיפוזיבית.

גזירת הנוזל (פלוקולציה אורתוקינטית)

גזירת הנוזל גורמת לגרדיאנט מהירות בשדה זרימה למינרי או טורבולנטי, והביטוי לכך הוא בהתנגשויות בין חלקיקים.

שיקוע דיפרנציאלי

מהירות שיקוע שונה של חלקיקים המוכתבת ע"י כוח הגרביטציה, גורמת להסעה אנכית של החלקיקים, ומביאה להתנגשויות ביניהם.

2.5.2 סוגי שיקוע שונים

לגבי חלקיקים הנמצאים בטווח הגודל עליו משפיע כוח המשיכה ($> 1 \mu\text{m}$), ניתן להבחין במספר אופנים של שיקוע:

Discrete settling – שיקוע של כל חלקיק בפני עצמו, כאשר החלקיק אינו משנה את מאפייניו במהלך שיקועו (למשל, אינו עובר פלוקולציה).

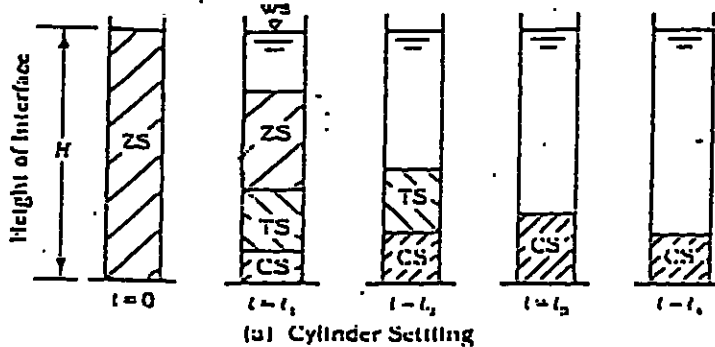
Flocculent suspension – בעקבות תהליכי הפתתה, גודל חלקיק יכול להשתנות במהלך שיקועו, וכך גם מהירות השיקוע גדלה בעומק מכל השיקוע.

Zone settling – תמיסה בה ריכוז המוצקים גבוה מאד והשיקוע מתבצע כ"גוש שוקע" בו חלקיקים בעלי גדלים שונים שוקעים במהירות זהה וקבועה. ניתן להבחין בגבול ברור בין השכבה השוקעת לבין תרחיף הנוזל הצלול (יחסית) מעליה, וזאת בזכות שכבת גבול (interface) ברורה ביניהם.

Compression zone – מתפתח באופן המשכי ל-zone settling, כאשר השכבה הנערמת של החומר ששקע מגיעה לשכבת הגבול בין הנוזל המוצלל למוצקים ונוצרת שכבת מים/ חלקיקים צפופה ביותר.

בהיות שני התהליכים האחרונים מורכבים יותר, קיים מאמץ רב יותר לפירושים: Holdich and Butt (1997) מרחיבים את תיאור ה- Zone settling תוך הדגשת ההנחות כי התמיסה הומוגנית מלכתחילה (דבר המאפשר קצב ירידה קבוע של החלקיקים) וכן כי ריכוז חלקיקים גבוה מביא להאטת קצב השיקוע (בניגוד לשיקוע פלוקולנטי טבעי בו לעכירות גבוהה יתרון בהרחקה מהירה יותר של החלקיקים מהמים, כפי שתואר לפני כן). בתחילת השיקוע התמיסה כאמור הומוגנית בריכוז (C_0) אולם משום שהשיקוע החל נוצרת שכבת נוזל בעלת ריכוז גבוה יותר בבסיס העמודה (C_1). בשלב הבא הריכוז בשכבה זו עולה שוב במעט (C_2) והשכבה שמעליה היא עתה בעלת הריכוז שהיה לשכבה שתחתיה (C_1), בנקודת הזמן הקודמת. כך מתקדם השיקוע, כאשר בכל נקודת זמן, בעוד החלקיקים נעים מטה נעה שכבת המים בעלת הריכוז C_1 מעלה לעבר שכבת הגבול, בעלת הריכוז C_0 . כאשר הן מתלכדות, יורד קצב השיקוע הכללי (עפ"י ההנחה שתוארה לפני כן). עתה, בעוד שכבת הגבול יורדת מטה, הולך ועולה בה ריכוז החלקיקים ע"פ אותו מנגנון שתואר ובאמצעות שכבות הריכוז הבאות: C_2, C_3 , וכו', כך שקצב ירידת שכבת הגבול הולך וקטן. כל התפתחות התהליך שתואר כאן (ציור 7), מוגדר להיות איפיון הריכוז (concentration 'characteristic') והוא בעל מהירות התפתחות קבועה.

Settling of a Concentrated Suspension



ציור 7: התפתחות אזורים ב- Zone Settling (Peavy, 1985)

המחברים מתארים את השיקוע מסוג compression (או consolidation) כמצב בו החלקיקים כה צפופים שניתן לתארם כמדיה פרוזי, בו הנוזל מצוי בחללים ויוצר לחץ מכני כנגד ה"מדיה" (=החלקיקים). אותו לחץ הוא בעצם התנגדות לדחיסה של החלקיקים. מוגדר שלב ביניים בין ה- zone settling לבין ה- compression, שנקרא 'channeling settling' המאופיין בקיום בו זמני של אזורים בעלי ריכוז קבוע (הריכוז המקורי), אזורים בעלי ריכוזים משתנים (בהתאם ל-'characteristic' concentration) וסדימנט. נטען כי תופעת ה- channeling מגבירה את קצב השיקוע משום אפשרות הנוזל להיסחט מחוץ לאזור החלקיקים הצפופים, לתמיסה המוצללת.

2.5.3 מסקנות מניסויי שיקוע

Font et al. (1994) מצא כי בניסויי שיקוע מנתי של תרחיף מהול, הצברים (האגרגטים) שנוצרו בריכוז המוצקים ההתחלתי הגבוה ביותר, היו בעלי קוטר צבר גדול ביותר ביחס לקוטרי הצברים שנוצרו בריכוז התחלתי נמוך יותר של מוצקים. כמו כן נמצא כי j , אינדקס נפח הצבר (מ"ק נפח צבר / מ"ק נפח מוצקים) גדל עם העליה בקוטר הצבר. משמעות הדבר כי תכולת המים בצברים אלו גדולה יותר. המחברים מעריכים כי הסיבה לכך נעוצה בקצבי יצירה שונים של הגבישים. באותו ניסוי נבדקה גם השפעת מהירות ערבוב שונה (500-100 rpm), אולם לא נמצאה השפעה משמעותית של מהירות הערבוב על התוצאות.

O'Melia et al. (1996) בחן את השפעת גודל החלקיק על הסתברות התקשרות כימית בין חלקיקים/ חלקיק ומצע, לאור תאוריית DLVO (כפי שתוארה לפני כן). הדבר נעשה באמצעות ניסויי הפרדת וירוסים מנוזל במערכת סינון בטווח ערכים של חוזק יוני וכן באמצעות סימולציות תנועה ביחס למשטח, של חלקיקים בגדלים שונים (קוטר: 30, 100, 300, 1000 nm) בחוזק יוני של 0.1M. הניסוי הראה באופן מפתיע כי לא התקיימה הרחקה של וירוסים באף חוזק יוני. הסימולציות באו כדי להסביר את הממצאים: נמצא כי ככל שחלקיק יותר גדול כך קיים מעבר לאזור ה-secondary minimum ועל כן ההתקשרויות שנוצרות הן הפיכות. ולחילופין, חלקיקים קטנים ביותר לא יושפעו מתחום זה אלא מה-primary minimum, דבר המבטיח את התקשרותם הבלתי הפיכה. למעשה אין הסכמה בין תוצאות הסימולציה לבין תוצאות ניסוי הסינון, שכן אף בחוזק יוני גבוה ביותר לא נרשמה ירידה בריכוזי הוירוסים ביציאה מהמסנן. המחברים טוענים כי אופיים הביולוגי של החלקיקים בניסוי (הוירוסים) משפיע על כוחות ואן דר ואלס הפועלים עליהם וכי תחום צר של כוחות דחייה ככל הנראה מעורב גם כן.

לדרמן (1984) ערך סדרת ניסויי שיקוע עכירות טבעית במים עיליים. המסקנות האופרטיביות שנבעו מהניסויים ההשוואתיים השונים היו כי גם אם אופי השיקוע דומה, הרי שככל שתהיה עמודת השיקוע צרה יותר כך יהיה השיקוע איטי יותר, משום ההשפעה המפריעה של הדפנות (wall support forces). כמו כן, נמצא כי בערכי עכירות תחילית דומים, נוכחות אצות מזרזת את תהליך השיקוע וכי בעכירות תחילית גבוהה (מעל 300 NTU) קצב השיקוע מהיר ושיעור העכירות המוסר בפרק זמן קצר, גבוה למדי (50% הסרת עכירות תוך פחות מ-75 דקות ו-90% הרחקה תוך כ-600-700 דקות, בעוד שבעכירויות נמוכות יותר 50% הרחקה הושגה לאחר 250 דקות ומעלה ואילו 90% הרחקה לא הושגה כלל).

מתוך הניסיונות בתנאים הטבעיים הועלו הגורמים הסביבתיים הבאים: נוכחות אבק מזרזת שיקוע בהיותו פלוקולנט טבעי; רוח מפריעה לשיקוע משום ערבול עמודת המים; זואופלנקטון טורף אצות (השפעה מפריעה לזירוז השיקוע).

2.5.4 מודלים מתמטיים לתאור השיקוע

שיקוע חלקיקים הוא תחום מורכב בו משחקים תפקיד גורמים רבים, עובדה המקשה את התיאור המתמטי של התהליך. להלן יסוקרו מספר מודלים מתמטיים המתמודדים עם התיאור הנייל. יש לציין כי תיאורו המתמטי של השיקוע עד כה, טיפל בעיקר בהיבטים הפיזיקליים, אולם

בשנים האחרונות נעשתה עבודה רבה ליצירת מודלים של מערכות מים טבעיות, בהם ניתן למצוא התייחסות מקיפה לגורמים הביוכימיים.

$$\begin{aligned}
 C_D &= \text{מקדם כח הגרר} \\
 d_p &= \text{קוטר חלקיק (m)} \\
 Re &= \text{מספר ריינולדס} \\
 g &= \text{תאוצת הכובד (ms}^{-2}\text{)} \\
 V_t &= \text{מהירות שיקוע של חלקיק (ms}^{-1}\text{)} \\
 \mu &= \text{צמיגות הנוזל (הידרודינאמית) (kg m}^{-1}\text{s}^{-1}\text{)} \\
 \nu &= \text{צמיגות קינמטית (m}^2\text{s}^{-1}\text{)} \\
 \rho_l &= \text{צפיפות הנוזל (kg m}^{-3}\text{)} \\
 \rho_s &= \text{צפיפות החלקיק (kg m}^{-3}\text{)} \\
 Sg &= \text{צפיפות יחסית}
 \end{aligned}$$

ביטוי כללי למהירות שיקוע של חלקיקים כדוריים בודדים ניתן במשוואה הבאה (Weber, 1972):

$$V_t = \left[\frac{4}{3} \left(\frac{g}{C_D} \right) \left(\frac{\rho_s - \rho_l}{\rho_l} \right) d_p \right]^{\frac{1}{2}}$$

C_D מקדם הגרר הוא פונקציה של מספר ריינולדס (Re), המאפיין את הזרימה, שיכולה להיות למינרית, במצב ביניים או מערבולית.

נוסחת סטוקס (Stokes' law) תקפה עבור זרימה למינרית, $Re < 1$:

$$V_t = \left[\frac{g}{18\mu} (\rho_s - \rho_l) d_p^2 \right]$$

זרימה במצב הביניים, $1 < Re < 1000$, מבוטאת בביטוי הבא:

$$V_t = \left[2.32 (\rho_s - \rho_l) d_p^{1.6} \rho_l^{-0.4} \mu^{-0.6} \right]^{0.714}$$

זרימה מערבולית בה $Re > 1000$ ו- $C_D \sim 4$, מיוצגת ע"י (Newton's law):

$$V_t = 1.82 \sqrt{\left(\frac{\rho_s - \rho_l}{\rho_l} \right) d_p g}$$

נמצא כי במי נחל המכילים שפכים קיימים חלקיקים במגוון צורות וטקסטורות. (Alon and Adin, 1993). חשיבות צורת החלקיקים טמונה בכך שצורת החלקיק משפיעה על מהירות שיקועו בהיות הצורה משפיעה על כוח הגרר שהמים מפעילים על החלקיק. חלקיקים לא כדוריים שוקעים בקצב איטי יותר מאשר חלקיקים כדוריים בעלי צפיפות ונפח זהים, בגלל היחס הגדול בין השטח לנפח

אשר גורם לתוספת בגרירה. לכל צורה גיאומטרית יחס אופייני בין R_c ל- C_D (Carmichael 1993).
 מקדם הגרר C_D , הוא פונקציה של צורת החלקיק, אותה ניתן לבטא באמצעות מקדם הצורה E :
 (5)

$$E = D_s \left[\frac{D_s^2 + D_i^2 + D_j^2}{3} \right]^{-\frac{1}{2}}$$

$E =$ מקדם צורה

D_i, D_j ו- D_s הם הציר הקצר ביותר, הבינוני והארוך ביותר, בהתאמה (m).

$$C_D / (24 / R_c) = 1.00 E^{-0.38}$$

ולפי היחס האמפירי: (6)

משוואת השיקוע המתאימה ביותר לחלקיקים אליפסואידליים וצינוריים בתנאים של זרימה למינרית (תיקון לחוק Stokes, משוואה (2)) (Komar and Reimers, 1978; Komar, 1978):
 (7)

$$V = \frac{g(\rho_s - \rho) D_n^2 \cdot E^{0.38}}{18\mu}$$

$D_n =$ קוטר נומינלי של חלקיק (m) ומבוטא ע"י:

$$D_n = \sqrt[3]{D_s D_i D_j} \quad (8)$$

במצב של קוטר חלקיק וטמפרטורה (צמיגות) קבועים יש צורך בהליכי "ניסוי וטעייה" לשם קביעת Re ובעקבותיו, C_D , בו תהיה הסכמה בין המשוואה הכללית של המהירות לאחת המשוואות שתבחר לפי אפיון זרימה משוער. Bhargava and Rajagopal (1992) ביקשו להימנע מהליכי ה"ניסוי וטעייה" המפרכים, ופיתחו ביטוי גרפי מורכב, המהווה מערכת המשלבת מגוון תנאים (צפיפות יחסית משתנה, קוטר משתנה, טמפרטורה (=צמיגות) משתנה) ומשתמשת במקדמים מספריים שחושבו תוך הקפדה על מקדם מתאם גבוה (0.999).
 (9)

$$\ln(Vt) = -54.6322 + 40.4532 [\ln(-\ln d_p)] - 0.3367 [\ln(\ln s_p)] + 8.2673 [\ln(-\ln v)] - 12.5788 [\ln(-\ln d_p)]^2 + 0.6165 [\ln(-\ln d_p)][\ln(\ln s_p)]$$

ניתוח יצירת צברים במהלך זרימה כלשהי מצריך את חישוב שיעור ההתנגשויות בין חלקיקים. עבור חלקיקים בעלי קוטר שונה, ריכוז שונה, קיימת מערכת משוואות המתאימה לאופי הזרימה
 (Amirtharajah and O'Melia, 1990). עבור זרימה למינרית:

(10)

$$(N_{ij})_p = \frac{2kT(d_i + d_j)^2}{3\mu d_i d_j} n_i n_j$$

$N =$ מספר התנגשויות בין חלקיקים מסוג i ו- j

$k =$ קבוע בולצמן $(\text{erg}^\circ\text{C}^{-1})$

$\mu =$ צמיגות הנוזל (הידרודינאמית) $(\text{kg m}^{-1}\text{s}^{-1})$

T = טמפרטורה (°C)

n = מספר חלקיקים מסוג i ו- j

התנגשויות בין חלקיקים המושפעות מגזירת הנוזל, במערכת בעלת גרדינט מהירות G ממוצע, יחשבו לפי:

(11)

$$(N_{ij})_0 = \frac{1}{6} n_i n_j (d_i + d_j)^3 G$$

G = גרדינט המהירות (s⁻¹)

בשיקוע דיפרנציאלי חלקיק בעל מהירות שיקוע גבוהה, בא במגע עם חלקיקים בעלי מהירות שיקוע נמוכה יותר, במהלך שיקועו בצילינדר. מספר ההתנגשויות בין חלקיק בעל ריכוז n_i לחלקיק

בעל ריכוז n_j:

(12)

$$(N_{ij}) = \frac{\pi g (s_g - 1)}{72 \nu} (d_i + d_j)^3 (d_i - d_j) n_i n_j$$

במשוואות התנגשויות החלקיקים שהובאו להלן (משוואות 10,11,12) ההתייחסות היא לקואגולציה מהירה. אולם, במקרים רבים יש צורך בתיקון אלקטרוסטטי, משום אנרגיית הסף הנדרשת לשם יצירת צבר יציב בעת התנגשות חלקיקים. הפרמטר α הוא פרקציית ההתנגשויות המובילות לקואגולציה יציבה והפתתה. חישוב פרמטר זה משלב את עובי השכבה החשמלית הכפולה (κ) ואת המחסום האנרגטי הנדרש (ψ max). חישוב מקורב של α (Amirharajah and O'Melia, 1990):

(O'Melia

(13)

$$\alpha = 2Rke^{-\psi_{max}/kT}$$

α = פרקציית ההתנגשויות המובילות להפתתה

R = רדיוס החלקיק

K = עובי השכבה החשמלית הכפולה

ψ max = המחסום האנרגטי

k = קבוע בולצמן (°C) erg*

התפלגות גודל החלקיקים (בתחומי גודל מעל 1 מיקרומטר) במי קולחין ניתנת לתיאור בביטוי מעריכי כפי שהודגם במספר מחקרים על מי קולחין ממתקנים שונים, לפני ואחרי טיפול מתקדם

(אלון, 1989; Kaminski et. al., 1996, Alon and Adin, 1994):

(14)

$$\frac{dN}{d(d_p)} = A(d_p)^{-\beta}$$

N = מספר חלקיקים

d_p = גודל חלקיק ממוצע בטווח

dN/d(d_p) = מספר חלקיקים בטווח הגודל

A, β = קבועים אמפיריים

משוואת הסעה/ פיזור של חלקיקים בריכוז מסוים (C), לפי שדה זרימה, נדרשת לפי Larsen (2000) שכן לדבריו מהירות הסעת חלקיקים פלוקולנטיים משתנה באופן משמעותי בשדה זרימה בעל שונות בזמן ובמרחב. לדבריו מהירות השיקוע צריכה להיות גורם תיקון למאזן המסה, כפיצוי על השפעת כוח הכובד:

(15)

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial x} + v \frac{\partial C}{\partial y} + (w - w_s) \frac{\partial C}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(D_z \frac{\partial C}{\partial z} \right)$$

x, y, z = קוארדינטות קרטזיות

u, v, w = מהירויות זרימה בכיוונים x, y, z בהתאמה ($m s^{-1}$)

Dx, Dy, Dz = מקדמי פיזור בכיוונים x, y, z בהתאמה ($m^2 s^{-1}$)

Ws = מהירות השיקוע ($m s^{-1}$)

בבניית מודל להבנת מאזן המסה במערכת טבעית, יש כמוכן להתייחס לגורמים הביולוגיים הכלולים בה, במיוחד כאשר אלו מהווים חלק ממסת ה"חלקיקים" במערכת. התייחסות למאזן מסה על נוכחות אצות, נעשתה (Farnsworth et al., 2000) באמצעות מדידות כלורופיל a (chl a):

(16)

$$d(\text{chl a})/dt = G_p(\text{chl a}) - D_p(\text{chl a}) - (v_s/h)^* (\text{chl a})$$

Gp = קצב גידול הפיטופלנקטון (s^{-1})

Dp = קצב תמותה (s^{-1})

vs = קצב שיקוע ($m s^{-1}$)

h = עומק (m)

2.5.5 עריכת ניסויי שיקוע

ניסויי שיקוע טבעי בעבר נערכו באופן שגובה הסדימנט השוקע בעמודה נמדד ונקבע קצב שקיעתו. כך גם נמדדים ערכי העכירות במי השיקוע בפרקי זמן שונים.

לדרגן (1984) ביצע ניסיונות שיקוע טבעי במי הירדן הדרומי לשם קביעת קצב הסרת העכירות במי הירדן שהוזרמו למאגר דיר חוגלה. נעשה שימוש בעמודות שיקוע, שאורכן 150 ס"מ, קוטרן 13 ס"מ ונפחן 21 ליטר. נקודות המדידה היו כל חמישה ס"מ. דגימת המים נשאבה באמצעות מחט, שהוחדרה למיכל דרך פקק גומי אוטם. העמודות היו עשויות פרספקס שקוף ובמהלך הניסוי הווארו במנורות נאון. כאמור, נמדד שינוי העכירות עם הזמן, אולם לעיתים נלקחו דגימות בנות 400 סמ"ק לשם בדיקת VSS, TSS וספירת אצות. כמו כן, נערכו ניסויים השוואתיים בין מיכל בן 10 ליטר למיכל בן 1 ליטר.

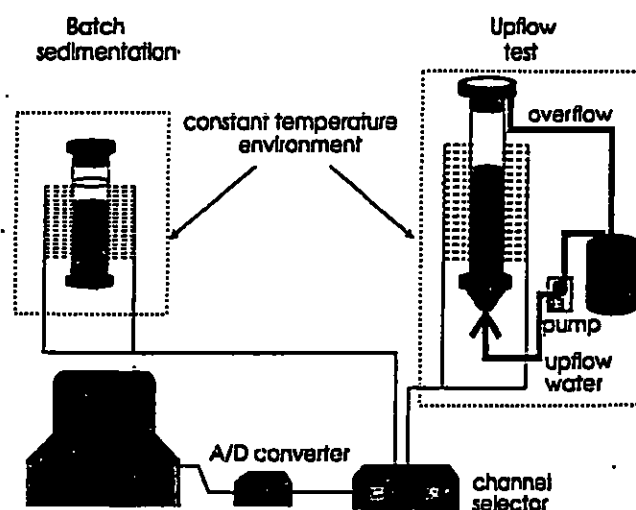
רוב הניסויים נעשו במעבדה אולם נערכו גם ניסויים השוואתיים בין עמודה שהוצבה על שפת מאגר דיר חוגלה לבין עמודת המים במאגר עצמו.

במחקר שהתמקד בשיקוע אצות במים היפרסאליניים (אסתר כהן-נח, 1982), נעשה שימוש בעמודות שיקוע בעלות ממדים דומים: גובה 150 ס"מ, קוטר 12.5 ס"מ ונפח של 18.4 ליטר.

היו גם כן במרחקים של 5 ס"מ, דבר שאפשר ייצוג מקטע של 600 מ"ל. צוין כי נפח דגימה היה 2 מ"ל בלבד כדי למנוע שינוי מהותי בגובה עמודת המים, דבר שיפגע באחידות תנאי הדגימה. צוין כי קושי נוסף, הינו קביעת זמן תחילת ניסוי השיקוע, כך שאנרגיה קינטית המוקנית לחלקיקים עם עירבול המים בעת הכנסת מי השיקוע לעמודה - תהא זניחה.

ניסיונות שיקוע שנערכו לשם הערכת נפח צברים וקוטרם (Font et al., 1994), השתמשו במיכלים בני ליטר אחד בלבד ונערך מעקב אחר גובה הסדימנט, לאורך זמן הניסוי (350 שניות). הערכת נפח הצברים וקוטרם נעשתה תוך שימוש במערכת משוואות המתייחסות לנתונים כגון: פרקציות נפח המים הצבורים באגרגט/ נפח המוצקים באגרגט, המבוטאים בפרמטר j (לפי Michaels and Bolger relation) ונוסחת Stokes הכוללת תיקונים למספר ריינולדס.

אמצעים מתקדמים ומתוחכמים יותר שומשו במחקר של Holdich and Butt (1997) (ציור 8). לשם מעקב פרטני אחר תהליך השיקוע הטבעי (החומר החלקיקי בניסויים אלו היה חרוזי זכוכית, גבישי ארגוניט וטאלק) נוסו מספר טכניקות: ניסויים מנתיים במכלים בעלי גובה של 350 מ"מ וקוטר 150 מ"מ; מבחן upflow במיכל בגובה מטר אחד וקוטר 65 מ"מ. השימוש במכלים בעלי קוטרם שונים נעשה כדי לבדוק את השפעת הדפנות. ריכוז מוצקים מקומי נרשם במהלך הניסוי המנתי וה- upflow, באמצעות זוגות אלקטרודות הממוקמות במרחקים של 10 מ"מ על המכלים שבשימוש. ההתנגדות החשמלית המקומית נמדדה, ותורגמה לריכוז מוצקים דרך כיול. אורך זמן איסוף המידע - 6 שניות. בטכניקה שלישית נעשה שימוש בשתי דיאפרגמות רגישות ששימשו כחישני לחץ לשם קביעת גרדיאנט לחץ הנוזל בין תחתית הכלי לחלקו העליון. הניסויים נערכו בשתי דרכים: ערבוב מסות ידועות של מוצקים בתרחיף ומדידת גרדיאנט הלחץ באופן מיידי וכן מדידות מתמשכות של הגרדיאנט במהלך השיקוע. בניסוי זה גם נמדד ריכוז המוצקים באופן שתואר לפני כן.



ציור 8 : אמצעי המעקב אחר השיקוע החלקיקים במחקר של Holdich and Butt (1997).

1. חומר מרחף במים עיליים הוא גורם חשוב המקיים קשר גומלין עם המדיום המוביל אותו, הנחל, ע"י השפעה על איכות המים ועל אפיוני הזרימה. מים עיליים שמקורם נגר עילי, יובילו בעיקר חומר מינרלי שמקורו באגן הניקוז (בליית סלעים, סחף קרקע). אולם, במקומות רבים בעולם, לרבות ישראל, נתפסים רוב מי המעיינות לשם ניצולם כמי שתייה ובמקומם מוזרמים בערוצי הנחלים שפכים/ קולחין באיכויות שונות. קולחין אלו משפיעים באופן משמעותי על איכות המים בנחל. הקולחין מביאים עימם חומר מרחף אורגני רב ובכך משנים למעשה את אופי החומר המרחף, ויחד עם זאת את מערכת הגורמים הקשורים והמושפעים ממנו.

2. הפרקציה דקת הגרגר ביותר ($1\text{nm}-1\mu\text{m}$) בקרב המוצקים המרחפים במים, היא הפרקציה הקולואידית, זוכה בד"כ למרב ההתייחסות הן משום הדומיננטיות שלה והן משום הקושי בהרחקתה. חלקיקים קולואידים יהיו בד"כ בעלי מטען חשמלי שלילי ובכל מקרה מטענם החשמלי יביא להיותם מוקפים שכבה חשמלית כפולה של יונים מגוף המים. מטען החלקיק ואפיוני השכבה החשמלית סביבו משפיעים רבות על יציבותו ועל התהליכים הכימו-פיזיקליים הנדרשים לשם ערעור יציבות זו. מעבר לשני גורמים אלו, קיימים עוד גורמים הייחודיים לחלקיק והנדרשים לשם ערעור יציבותו (גודל החלקיק, תכונות פני השטח שלו, וכו') וכן גורמים סביבתיים הנגזרים מהמדיום בו שרוי החלקיק ובעלי חשיבות גבוהה גם הם (טמפרטורה, רמת הגבה, חלקיקים/ יונים אחרים במים, ערבול/ הסעה וכו').

3. בעת אפיון החלקיקים במי הנחל יש לתת את הדעת על מקור המים, מדדים שונים לאפיון המוצקים המרחפים וכן על מדדי איכות מים כלליים אחרים העשויים לשפוך אור על התהליכים בהם מעורבים החלקיקים ועל מצבו של הנחל בכלל. מידע כזה יאפשר את הבנת הכוחות הפועלים על החלקיק, ואת חיזוי תהליכי השיקוע הטבעי המתרחשים בנחל והחשובים ביותר מבחינת טיהורו העצמי (בלא להתייחס בשלב זה לתהליכים המתרחשים על פני הקרקעית). כפי שניתן היה להבין מסקירת הספרות מערכת נחלית טבעית ובמיוחד זו המופרעת ע"י האדם, היא מערכת מסובכת למדי, בעלת מרכיבים מגוונים שהם בעלי השפעות סותרות לעיתים. הציור הבא (ציור 9) מתאר באופן סכמטי את עיקרי הדברים לגבי הגורמים הדומיננטיים במערכת הנחלית ואת הקשרים ביניהם. לא כל הגורמים הקיימים פורטו ולא כל הקשרים סומנו וזאת לשם הפשטת הציור. להלן הערות נלוות המפרטות את התהליכים המתרחשים בין הגורמים השונים בציור:

- נוכחות אלקטרוליטים במים, קטיונים (למשל Ca^{2+}), או אניונים (למשל SO_4^{2-}) ישפיעו על עובי השכבה החשמלית. כך למשל נוכחות קטיונים דו ערכיים של קלציום או מגנזיום יעודדו קואגולציה של חלקיקים טעונים שלילית (חרסיות וחומר אורגני) ע"י מנגנון של צמצום השכבה החשמלית, דבר שיאפשר את התקרבותם ואת פעולת כוחות משיכה (ואן דר ואלס). מנגנון אפשרי נוסף הוא קישור כימי ונטרול מטען.
- גודל החלקיק ישפיע על הכוחות הפועלים עליו: מעל מספר מיקרומטרים ישפיע כוח המשיכה שיעודד שיקוע מהיר (יחסית). שיקוע איטי יותר צפוי לחלקיקים בני כ- $1\mu\text{m}$ המושפעים מכח הגרר וחלקיקים הקטנים ממיקרומטר ינועו באופן דיפוזיבי ויהיו

מושפעים מהאנרגיה התרמלית של מולקולות המים ובעצם לא צפויים לשקוע. גודל החלקיק משפיע גם על פוטנציאל יציבות הצבר בו יהיה מעורב, לפי תאוריית ה-DLVO.

- אופי החומר המרחף – חלקיקים מינרליים בריכוזים גבוהים בתרחיף יכולים, עם שיקועם, ליצור אפקט של סחיפה (sweep coagulation) ולשקע עמם חלקיקים בעלי מהירויות שיקוע נמוכות יותר. כך גם ניתן יהיה לראות במדיום כזה תופעות של zone settling ו-compression. באופן כללי תרחיף המורכב בעיקר מחומר מינרלי יעבור תהליכי טיהור עצמי וטיפול באופן קל הרבה יותר מתרחיף המושתת על חומר אורגני חלקיקי. מעבר למשקל הסגולי, חומר אורגני חלקיקי יכול להיות בעל נגזרות מסיסות, הנוטות ליצירת קומפלקסים עם חלקיקים אורגניים/ אי אורגניים וע"י כך לייצבם באופן שיחבל בתהליכי קואגולציה עם חלקיקים אחרים.
- אצות מהוות מחד חלקיקים אורגניים קשיי הרחקה ומאידך מפיקות האצות פוליסכרידים המסייעים בתהליכי הסרת החומר המרחף מגוף המים. הדבר נכון בעיקר בריכוזים גבוהים של חלקיקים מינרליים ו/או אצות בתרחיף. הפוליסכרידים החוץ תאיים מביאים לקואגולציה של חלקיקים ע"י מנגנון של ספיחה וגיזור (הספיחה מתרחשת על קבוצות פונקציונליות בפני השטח של חלקיקים שונים). היות האצות חלקיקים בפני עצמן ובמיוחד חלקיקים ביולוגיים, דורש כי נתייחס לנתונייהן הייחודיים: צורה תשפיע על יכולת ציפה; הימצאות בשלב חיים כלשהוא ומצב פיזיולוגי משפיעים גם הם על סיכויי שרידת התא בגוף המים; אצות להן כושר תנועה במים מקשות עוד יותר את חיזוי הסרתן מהמים. לכל אחד מהגורמים השפעה על מהירות שיקוע האצות בגוף המים.

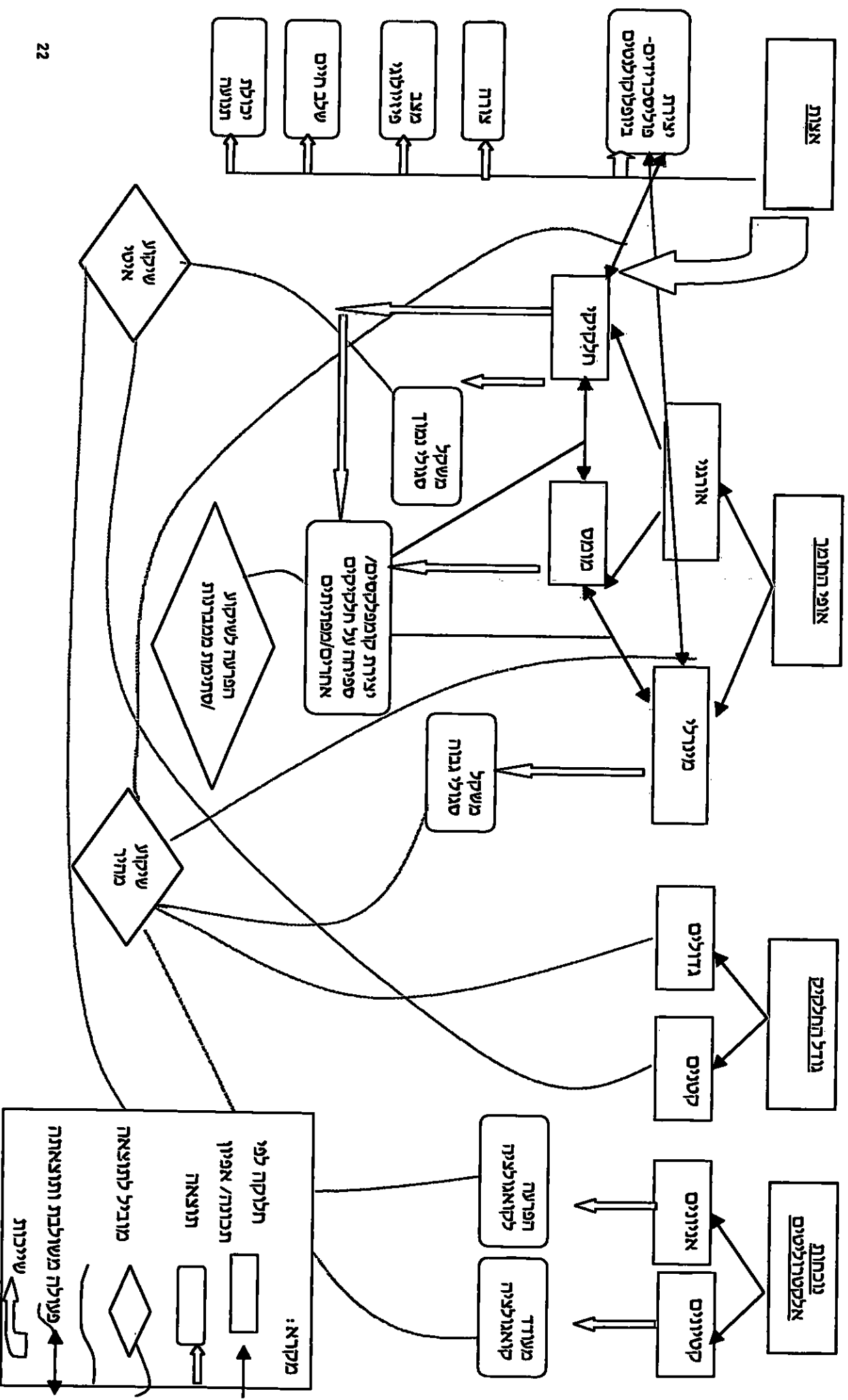
4. מודלים מתמטיים רבים קיימים לתאור וחיזוי שלבים שונים במהלך שיקועו של החלקיק. יש לדעת להגדיר את התהליכים המאפיינים את המערכת, כדי לבחור במערכת המשוואות הנכונה, שתיתן את החיזוי הקרוב ביותר למציאות. את החיזוי רצוי להשוות לניסויים ולמצוא את הדומה והשונה לשם הבנת התהליכים לאשורם.

5. בעת ביצוע דיגום בגוף מים עיליים ואיסוף נתונים על איכות המים, יש להתייחס לגורמים כמו צורת הנחל ועומקו, מיקום כניסת מזהמים, ספיקותיהם ואופים. פריסת הדיגום במרחב ובזמן צריכה להבטיח יצירת תמונה מלאה על הקורה בנחל.

6. ניסויי שיקוע טבעי במעבדה רצוי שיבוצעו בתנאים דומים ככל האפשר לתנאי השטח: עמודת השיקוע תהיה בגובה מקורב לעמודת המים בנחל (בהתאם למטרת המחקר ולתנאי השטח), רוחב העמודה צריך להיות מספיק גדול בכדי למנוע את השפעת דפנות העמודה (השפעות שכמוכן אינן קיימות בגוף המים הטבעי, למעט בסמיכות לגדות, שגם אז הן זניחות יחסית). אופן דיגום המים בעמודה צריך להיות כזה שלא ישפיע בעצמו על התוצאות. יש לזכור כי למרות הכל, ניסויי המעבדה יתנו תוצאות שונות מעט משיקוע בתנאי שדה מלאים, משום העדר תנאים סביבתיים כמו רוח, אבק, מערכת אקולוגית שלמה, שינויי טמפרטורה ותאורה וכ"ו. שוני זה צריך להילקח בחשבון בעת תכנון יישום תוצאות המעבדה.

7. טיפול במי הנחל יכול להתחלק לסוגי טיפול שונים ע"פ איכות יעד אליה שואפים, ע"פ הגורם המזהם העיקרי וע"פ גישות טיפוליות שונות (גישות כימו-פיזיקליות, גישות ביולוגיות וכד'). כאשר יעד הטיפול הוא (גם אם בחלקו) החלקיקים בזורם, עומדים לרשות הגורם המטפל אמצעים כימו-פיזיקליים, כגון שימוש במפתיתים, סינון לכדי דרגות שונות, אמצעי ספיחה ועוד. מערכת נחלית היא מערכת טבעית הכוללת בתוכה גורמים בעלי אופי ביולוגי ייחודי ומתרחשים בה תהליכים ביוגאוכימיים רבים. התייחסות לנקודה זו, עשויה לתת תוצאות טובות בזכות עידוד התהליכים הביוגאוכימיים הטבעיים, שיביאו לטיהור העצמי של הנחל.

צירוף 9: תאור סכמתי של האורמים העיקריים המשפיעים על החומר המרחף ומשמעותם



3. שיטות וחומרים

3.1 מדידות (בנוסף לאלו שפורטו בדו"ח הקודם)

בליעת UV באורך גל 254nm נעשתה ב- UV-Visible spectrophotometer (CARY 1E, Varian).

מדידות ה-TOC נעשו ב-TOC Analyzer (DC-80), (Dohrmann, Envirotech). עקרון פעולת המכשיר הוא קריאת פחמן ע"י דטקטור של קרן אינרא אדום, לאחר שהנוזל עבר בריאקטור המפרק את החומר האורגני באמצעות מנורת UV ותומצת פרסולפט. כדי למנוע טעות הנובעת ממדידת הפחמן המנרלי שמקורו בצורוני הקרבונט, יש להיפטר מצורונים אלו תחילה (לפני מעבר התמיסה בריאקטור) ע"י הוספת חומצה עד כדי הגעה ל- $pH=2$ ובעבוע של חנקן במשך מס' דקות.

סריקת יסודות ותרכובות נעשתה ב- ICP (Perkin Elmer), Optima XL.

3.2 ניסויי השיקוע

ניסויי השיקוע נערכו בשני חלקים: חלק א' כלל ניסוי שיקוע עבור על אחת מארבע התחנות שפורטו להלן. חלק ב' כלל ניסוי שיקוע בתחנה אחת בלבד לשם מעקב פרטני יותר אחר התהליכים המתרחשים בעת השיקוע.

מי ירקון עבור ניסויי השיקוע נשאבו מהנחל, מעומק של כ- 30 ס"מ וממרחק של כ- 2 מטר מהגדה.

עיקר המערכת הניסויית במעבדה היה עמודת שיקוע, מכשיר מונה חלקיקים (המספק את הפרמטרים TPC (total particle count) ו- PSD (particle size distribution) ומד עכירות. מי המקור לכל ניסוי גם נבחנו מבחינת ריכוז המוצקים המרחפים בהם (כלליים (TSS) ונדיפים (VSS) ופוטנציאל ζ). בחלק ב' נלקחו ממי המקור גם מדידת טמפרטורה ואנליזת חוזק יוני והמבחנים (TSS, VSS) ופוטנציאל ζ) בוצעו גם לדוגמאות מים בעומקים שונים, במהלך השיקוע.

עמודת השיקוע היא גליל בעל קוטר של 29 ס"מ. הגובה שנוצל היה בסביבות 150-170 ס"מ, כך שהנפח האופרטיבי היה כ- 100-112 ליטר. הוחלט לעשות שימוש בעמודה בעלת ממדים גדולים לשם הקרוב הטוב ביותר לתנאי הנחל ע"י צמצום השפעות הדפנות (wall effects). כמו כן עמודה רחבה מאפשרת לקיחת דגימות בלא השפעה משמעותית על גובה המים וכך ההפרעה לשיקוע מצומצמת. עשרה ברזים במרחקים של 15 ס"מ מוקמו לאורך העמודה בצורה ספיראלית כדי לצמצם את השפעת כל ברז על מאזן החומר בברז תחתיו. כל ברז היה מחובר לצינורית פנימית (בתוך המכל) שאורכה 5 ס"מ וזאת כדי לדגום מתוך המכל ולא מאזור הדפנות. מי הירקון שהובאו במכלים עורבבו היטב ואז נשפכו לתוך העמודה. לאחר שפיכת כל המכלים, עורבבו המים בעמודה קלות, ע"י מוט. תחילת הניסוי החלה בתוך מספר דקות מתום הערבוב.



בחלק אי של ניסויי השיקוע התבצעו הניסויים בד"כ לפי הסכמה המתוארת כאן :

נלקחה דוגמא בזמן 0 מנקודת גובה מייצגת (בד"כ עומק של כ- 30 ס"מ). בשעתיים הראשונות נלקחו דגימות המים מ 3-4 ברזים עליונים, כל חצי שעה. לאחר מכן נלקחו דגימות מכל העמודה במרווחי זמן הולכים וגדלים. בסה"כ נערכו ביום הראשון 7-10 סדרות של דיגום עמודת המים. הסיבה לכך שבתחילת הניסוי נלקחו דגימות מרום העמודה בלבד, היא ההנחה שתהליכי השיקוע האיטיים לא יהיו בעלי השפעה ברת מזידה בתחתית העמודה. ביום השני לניסוי נלקחו בד"כ 3 סדרות של דיגום לאורך היום ובימים הבאים הלכו והצטמצמו מספר הדיגומים, משום שמטרתם הייתה לעקוב אחר קצב השיקוע הכללי ("שטף השיקוע") ולא אחר תהליכים פרטניים בגוף המים.

בחלק ב' של ניסויי השיקוע נלקחו דגימות מדי שעה ביום הראשון. בשאר ימי הניסוי נלקחה סדרת דגימות אחת בלבד בכל יום, לשם מעקב אחר שטף השיקוע.

קביעת ריכוז החלקיקים והתפלגות גודלם נעשה שימוש במונה חלקיקים. כדי שדוגמת מים תהיה בתחום הקריאה של המכשיר, היה צורך במיהולה. המיהול נעשה ע"י מי ירקון מאותה תחנה (כדי לא להביא לשינויים בתכונות החלקיקים) שסוננו קודם לתחילת הניסוי, בפילטר 1.22 מיקרומטר. דגימת מים מהעמודה היתה בת כ- 15-5 מ"ל, לפי יחס המיהול שנקבע והדוגמה שהוכנה למכשיר היתה בת 75-80 מ"ל כאשר דיגום המכשיר מתוכה היה תמיד של 60 מ"ל מחולקות ל- 3 הרצות שוות. לאחר המיהול ולפני הרצת הדוגמה במכשיר הייתה דוגמת המים מעורבת תוך שימוש בבוש מגנטי לשם ערבוב המים הנמהלים ולשם מניעת שיקוע חלקיקים.

בחלק א' של ניסויי השיקוע, לא תמיד היה שימוש במדידות עכירות מעבר לערך התחלתי וערך סופי. כאשר כן היה שימוש בבדיקות עכירות, נלקחו המדידות מעומק זהה (בדיכ 30 ס"מ) לאורך נקודות זמן בניסוי ובסוף הניסוי נלקחה מדידת עכירות מכל העמודה. בחלק ב' של ניסויי השיקוע נלקחה בכל סדרת דגימות מדידת עכירות מעומק 30 ס"מ. בחלק זה של הניסויים גם נאספו נתונים שונים במהלך הניסוי מעומק קבוע של 30 ס"מ ופעמיים מרצף ברזים (עומק 30-60 ס"מ) ביומו הראשון של הניסוי, כדי לעקוב פרטנית אחר תהליכים במים. נתונים שנאספו היו: pH, VSS, TSS, עכירות, ובמקרים בודדים גם פוטנציאל ζ , ובליעת UV באורך גל של 254nm. במקרה הצורך נלקחו המדידות הני"ל גם מעומק שלא לפי הפירוט שהוצג. במקרים בהם נלקחו כל המדידות הני"ל היה צורך בדגימת מים בת כ- 250 מ"ל.

במחקר זה הוחלט לעקוב אחר שיקוע החלקיקים באמצעות מונה החלקיקים ככלי עיקרי ומד עכירות ככלי משני וזאת בניגוד לניסויי שיקוע בעבר. הסיבה לכך נעוצה בעובדה שבעבור חלקיקים גדולים מ- 1 מיקרון מוני חלקיקים מספקים מדידה יותר רגישה של החומר החלקיקי מאשר מדי העכירות (Van Gelder et al., 1999).

3.3 מעקב אחר שיקוע חומר אורגני

בניסוי זה נערך מעקב אחר שינוי ריכוז החומר האורגני במים, עם הזמן. שלוש מסורות של 2 ליטר כל אחת שומשו לניסוי זה (גובה בשימוש כ- 33 ס"מ, קוטר 9 ס"מ). מסורה אחת הכילה את מי התחנה אבו רבאח, מסורה שניה הכילה את מי התחנה שבע טחנות ומסורה שלישית הכילה מים מסוננים מהתחנה שבע טחנות.

בתחילת הניסוי ובזמנים שונים במהלכו נלקחו מדידות TPC, קריאת UV, TOC, ופוטנציאל ζ .

3.4 אופטיקת אצות – (תוצאות ראשוניות מופיעות בנספח 5)

Van Gelder et al. (1999), מתריעים על כך שבשימוש במונה החלקיקים עבור חלקיקים מחומר בעל תכונות שבירה שונות מהחלקיקים באמצעותם הוא כויל, יהיו סטיות בתוצאות. כדי לבחון טענה זו ותצפיות עבר המורות על בעייתיות קריאת האצות ע"י מונה החלקיקים, הוחלט לערוך

ניסויי קריאת אצות מתרביות טהורות, בעלות ריכוז וטווח גודל ידועים. מטרת ניסויים אלו היתה לתת הערכה כמותית לשיעור סטיית המכשיר מהספירה המיקרוסקופית.

אצות ממין *Chlorella* שנמצאו שכיחות מאד במי הירקון (מנתוני הדו"ח הקודם), נבחרו להיות אוכלוסיית האצות הראשונה עליה נערכו ניסויי קריאת מונה החלקיקים. האצות כדוריות ומצויות בטווח הגודל $2-8\mu\text{m}$. תרביות קיימות של האצות גודלו במדיום BG11 (שמיועד בד"כ לכחוליות, אך נמצא מתאים ביותר ל-*Chlorella* הירוקית), בטמפ' של 30°C , בתנאי תאורה.

פרוצדורת ספירת אצות

1. תרבית אצות נמהלה במים מזוקקים (בעלי מספר חלקיקים נמוך מאד ומדוד) לכדי ריכוזים שונים בתחום 10^3 ו- 10^6 , כדי להתאים לטווח הקריאה של המכשיר (סדר גודל של 10^3).
2. נערכה ספירה במקרוסקופ.
3. עד לניסוי הספירה במונה החלקיקים ובמהלכו, עורבבו דוגמאות המים ע"י בוחש מגנטי ובתנאי חשכה וזאת כדי לשמור על ריכוז זהה (מניעת תנאי התרבות) ומניעת שיקוע האצות.
4. מונה החלקיקים ששימש לניסוי היה אותו אחד ששימש לניסויי השיקוע.

נערכו נסיונות למצוא אופן צביעה של האצות שיאפשר קריאה גבוהה יותר במונה החלקיקים. פותחה טכניקת צביעה באמצעותה נעשתה השוואה בין תרבית לא צבועה, תרבית צבועה באמצעות תמיסת Lugol (תמיסה המבוססת על יוד והיא בעלת יכולת קיבוע) ותרבית הצבועה בשילוב של Lugol + Methyl Blue. לצורך מבחני הצביעה נעשה שימוש באצות ממין *Synedra* (באדיבות מעבדת הכנרת), ממשפחת הצורניות, שנמצאו בגודל $12 \times 3\mu\text{m}$ (מופיעות במי הירקון בממדים גדולים יותר: $60 \times 3\mu\text{m}$).

פרוצדורת צביעה:

1. הכנת שני "אפנדורפיס" מכל סוג:
סט 1: $950\mu\text{L}$ תרבית + $50\mu\text{L}$ Lugol
סט 2: $950\mu\text{L}$ תרבית + $25\mu\text{L}$ Lugol + $25\mu\text{L}$ Methyl Blue
סט 3: $1000\mu\text{L}$ תרבית לא צבועה
2. סירכוז 7 דקות בצנטריפוגה במהירות של 10,000 RPM.
3. הוצאת הנוזל בזהירות.
4. הרחפת המשקע (אצות) במים מזוקקים (בעלי מספר חלקיקים נמוך מאד ומדוד). העברת התמיסה לכלים נקיים והשלמת כל דוגמא ל-50 מ"ל באותם המים. ערבוב היטב.
5. הרצת הדוגמאות במונה החלקיקים. שתי הרצות בנות 20 מ"ל עבור כל דוגמת מים.

4. תוצאות

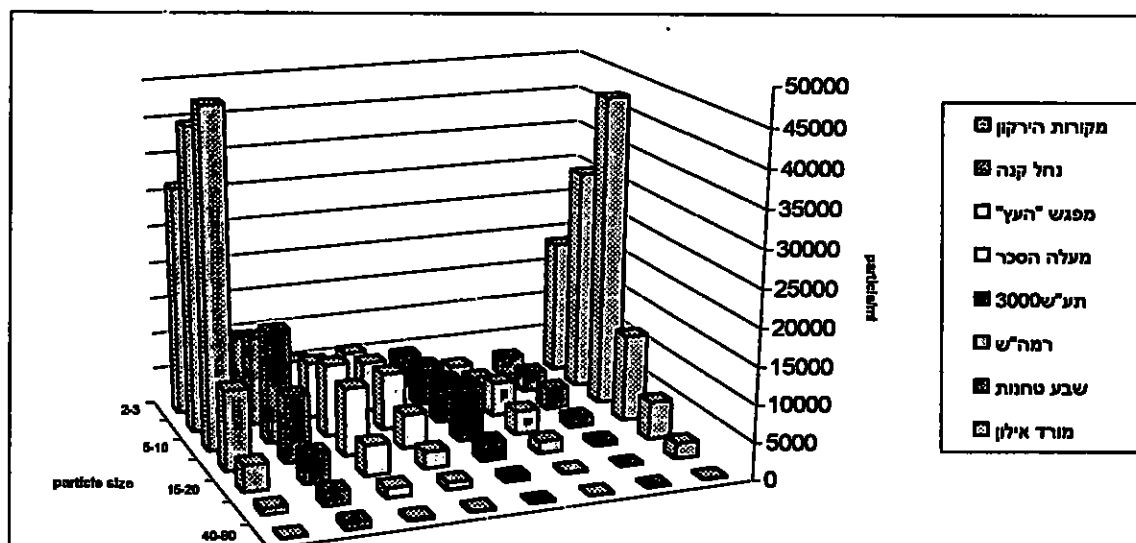
4.1 אפיון רציף של הנחל

לשם קבלת תמונה מלאה יותר על התהליכים המתרחשים בנחל נערך דיגום לאורך הנחל כולו, כולל מקורות המים שלו, בחודש נובמבר 1999. נקי' הדיגום נחל קנה ורמת השרון הן דגימות במי מקור המוזרם לנחל ולא בגוף הנחל עצמו (מסומנות בטבלה 1 בהדגשה). נתוני החומר המרחה בתחנות הדיגום מובאים בטבלה 1 ובצירור 10.

טבלה 1: נתוני המוצקים המרחפים והעכירות לאורך הנחל ובמקורותיו.

נקי' דיגום	עכירות (NTU)	TSS (mg/L)	VSS (mg/L)	%VSS
מקורות הירקון	53	67.4	15.7	23
נחל קנה		151	101.2	67
מפגש "העץ"	27	39.7	29	73
מעלה הסכר	22	60	38.3	64
תע"ש 3000	14	25	21	84
רמה"ש	2	6	6	100
מורד רמה"ש	14.7			
שבע טחנות	9	9.5	6.5	68
מורד אילון	35	104.8	31.9	30.4

התפלגות גודלי החלקיק לאורך הנחל דומה למדי, עם התחזקות הפרקציה $10-15\mu\text{m}$ מהתחנה מפגש "העץ" ועד התחנה תע"ש 3000+.



צירור 10: התפלגות גודל החלקיק בתחנות הדיגום

דיגום הנחל המשלים את הדיגומים, שהוצגו בדו"ח הקודם, נערך בתודשים אוגוסט '99 ונובמבר '99. התוצאות מוצגות בנספח 1.

4.2 ניסויי שיקוע – חלק א' (ניסויי שיקוע עבור ארבע התחנות)

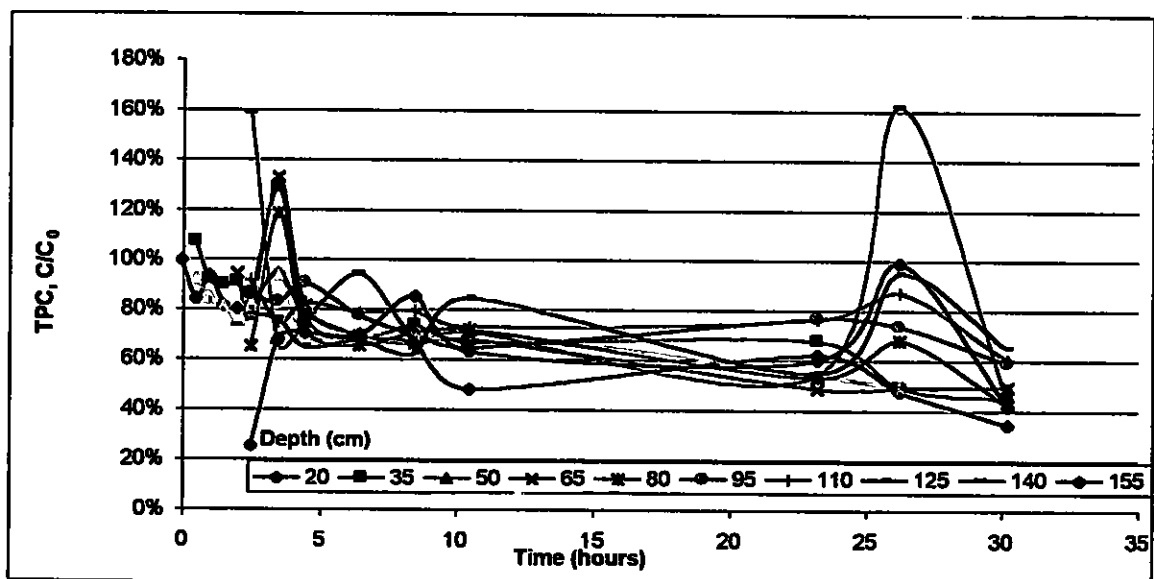
אבו רבאח – פברואר 2000

הדגימה נלקחה לאחר ימי גשם. סביבות הנחל בוציות מאד. נתוני מי המקור מוצגים בטבלה 2:

טבלה 2: נתוני התחלת הניסוי באבו רבאח

TSS(mg/L)	VSS(mg/L)	Turbidity (NTU)	ζ Potential (mV)	TPC ₀ per ml	Dominant Fraction
37	שיעור זניח של 0.02% מתוך ה-TSS	44.5	-20.1	95,600	3-5 μ m (33%)

השתנות שיעור ריכוז החלקיקים שארייתיים לאורך העמודה, במשך 30 השעות הראשונות של ניסוי השיקוע (ציור 11):

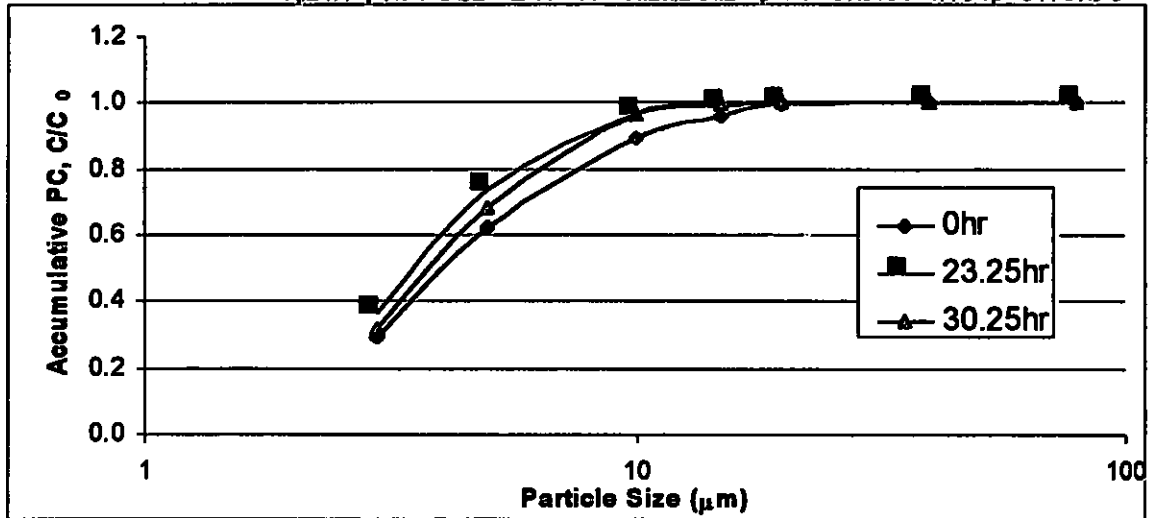


ציור 11: השתנות TPC שארייתיים ב-30 השעות הראשונות, אבו רבאח

כולטת תופעה של פלוקטואציות (עליות וירידות של הערכים) בריכוזי החלקיקים במהלך השעות הראשונות של הניסוי (תופעה זו מופיעה גם בשאר ניסויי השיקוע כפי שניתן יהיה לראות בהמשך).

לאחר 30 שעות מתחילת הניסוי הערכים בעומקים השונים נעים בין 30% ברום העמודה, לכ- 65% בגובה 45 ס"מ מבסיס העמודה (עומק 125 ס"מ). ערך סופי נמדד לאחר כשבועיים, והיה דומה לאורך העמודה. הריכוז הסופי היה 11% מ-TPC₀.

ציור 12 מציג את מספר החלקיקים המצטבר לפי התפלגות גודלם והשינוי בהתפלגות לאורך 30 שעות השיקוע הראשונות. לא קיימת מגמה אחידה ב- PSD לאורך הזמן.



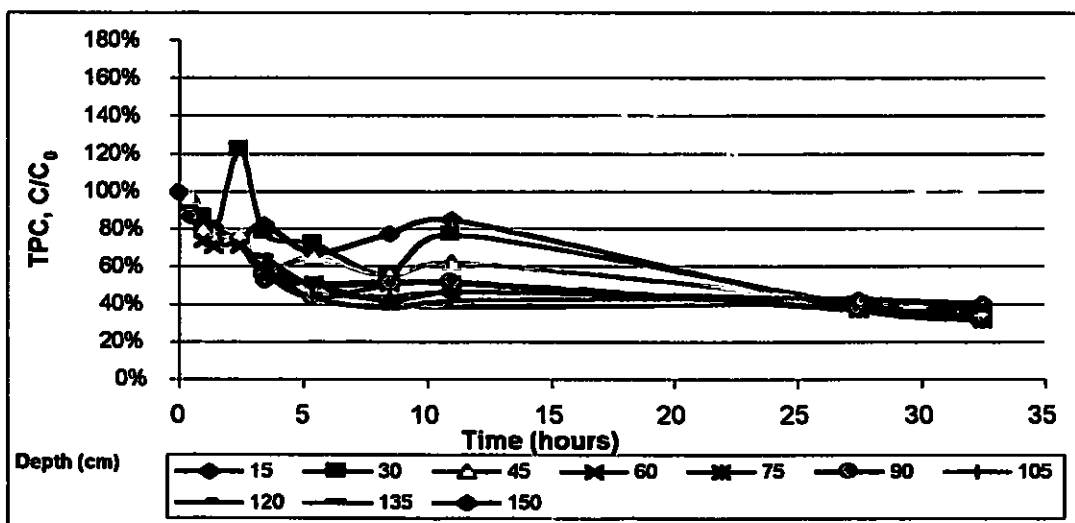
ציור 12: שינוי PSD במהלך הניסוי, אבו רבאח

תע"ש 3000 + - מרץ 2000

הדיגום נערך במהלך ימי גשם אולם קדמו להם שבועיים שמשיים ותמימים, דבר שהתבטא בריכוזי אצות גבוהים, שנראו לעין בביורר. נתוני מי המקור מוצגים בטבלה 3:
טבלה 3: נתוני התחלת הניסוי, תע"ש 3000+

TSS(mg/L)	VSS(mg/L)	Turbidity (NTU)	ζ Potential (mV)	TPC₀ per ml	Dominant Fraction
29	23 (80% מ-TSS)	29	0.2 ± 20.7	110,586	5-10 μm (51%)

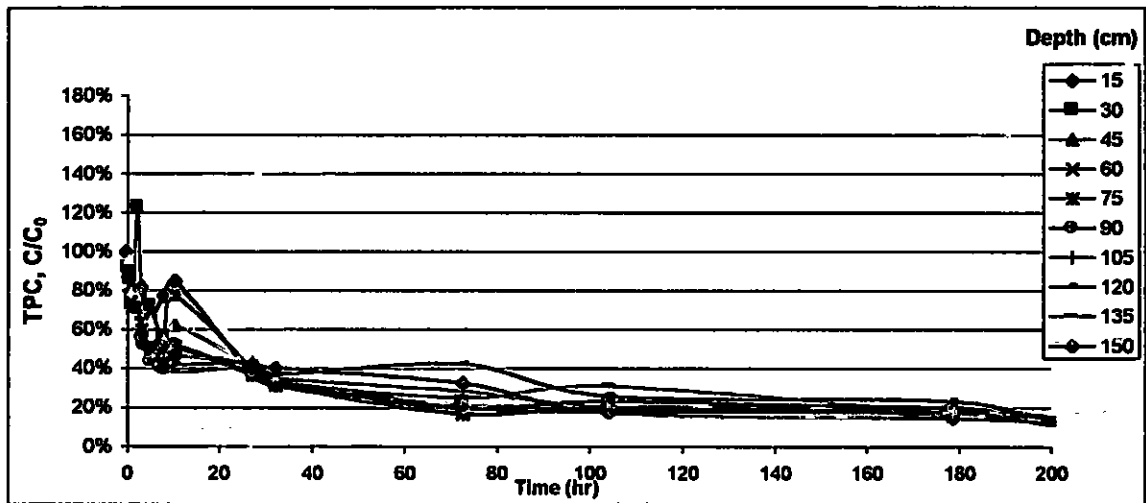
השתנות שיעור ריכוז החלקיקים השארייתי לאורך העמודה, במשך 30 השעות הראשונות של ניסוי השיקוע מוצגת בציור 13:



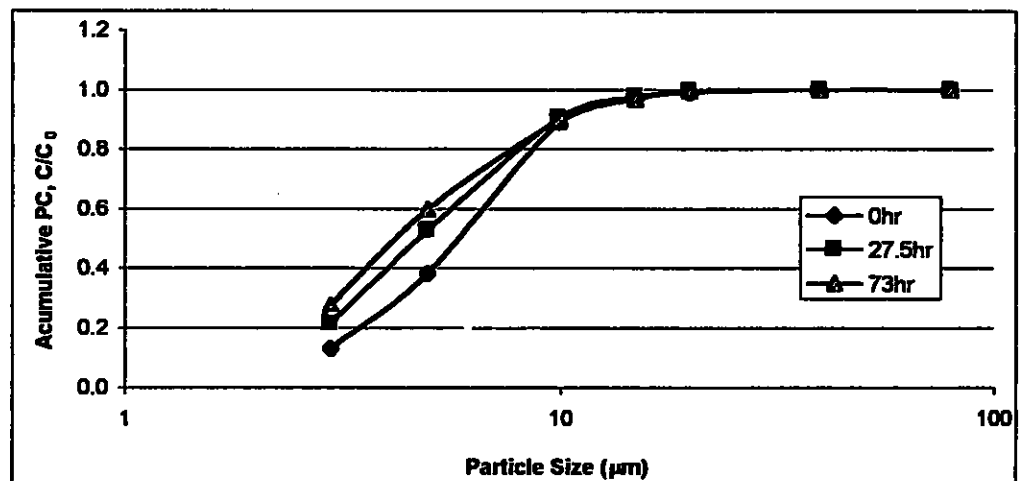
ציור 13: TPC שארייתי ב- 30 השעות הראשונות, תע"ש 3000+

כבר לאחר כ- 24 שעות ישנה ירידה בריכוז החלקיקים לאורך כל העמודה. הריכוזים הנותרים נעים סביב כ- 40% מהערך התחילי. בהמשך הניסוי נצפה המשך ירידה מתונה (ציור 14).

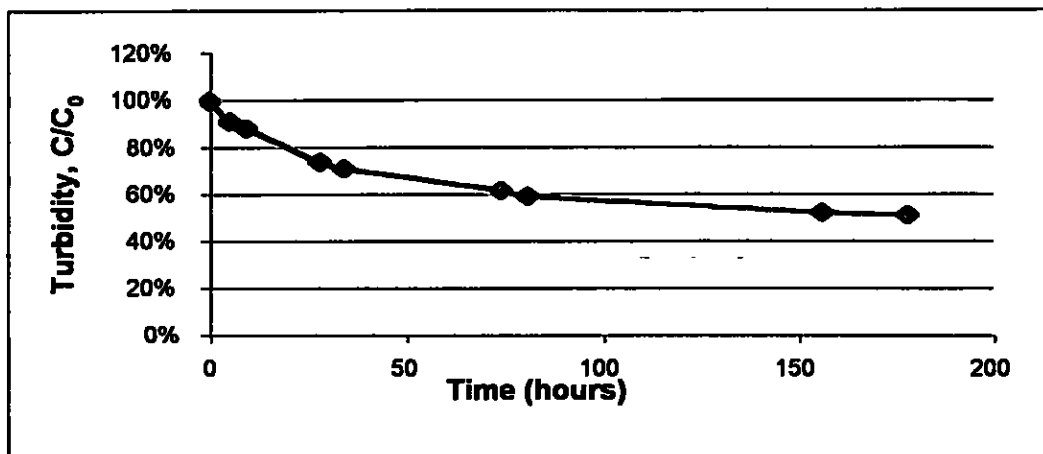
ה- PSD שנמדד ברום העמודה משתנה לאורך הניסוי, ופרקציות גודל שונות בעלות שיעור שונה בקרב סך החלקיקים (ציור 15). מדידות העכירות לאורך הניסוי בעומק 30 ס"מ, מראות כי עכירות המים ברום העמודה קטנה בקצב איטי - לאחר כ- 30 שעות ה- עכירות השארייתית היא כ- 72% מהעכירות התחילית (ציור 16).



ציור 14 : TPC שארייתי לאורך הניסוי, תע"ש +3000



ציור 15 : שינוי ה- PSD לאורך הניסוי, תע"ש +3000



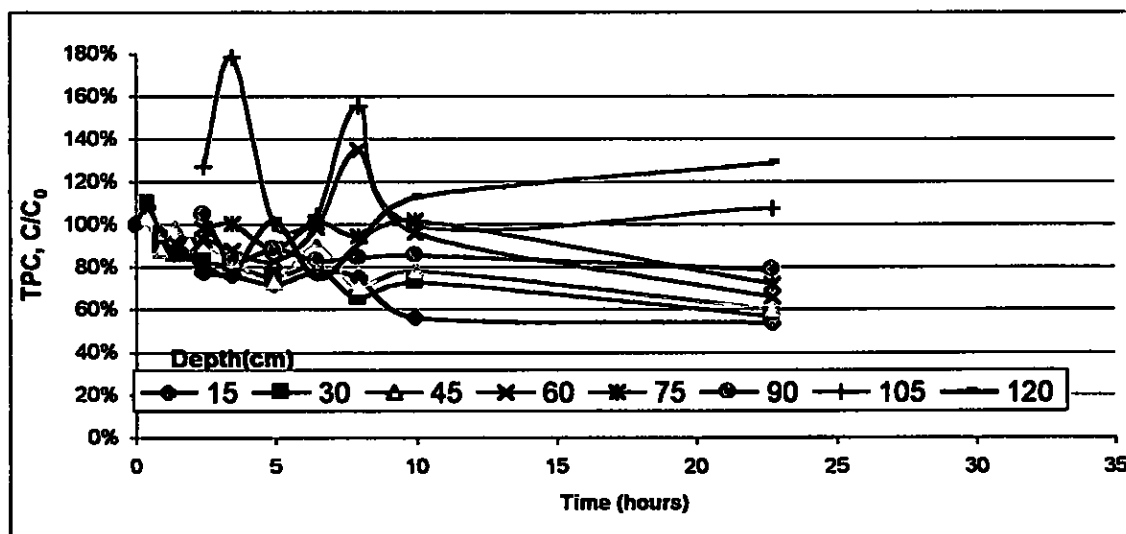
ציור 16: עכירות שארייתית לאורך הניסוי, עומק 30 ס"מ, תע"ש +3000

שבע טחנות – ינואר 2000

דיגום המים נעשה בימים חורפיים, דבר שהתבטא בריכוזי אצות זניחים (טבלה 4). השתנות שיעור ריכוז החלקיקים השארייתי לאורך העמודה, במשך היממה הראשונה של ניסוי השיקוע מוצגת בציור 17.

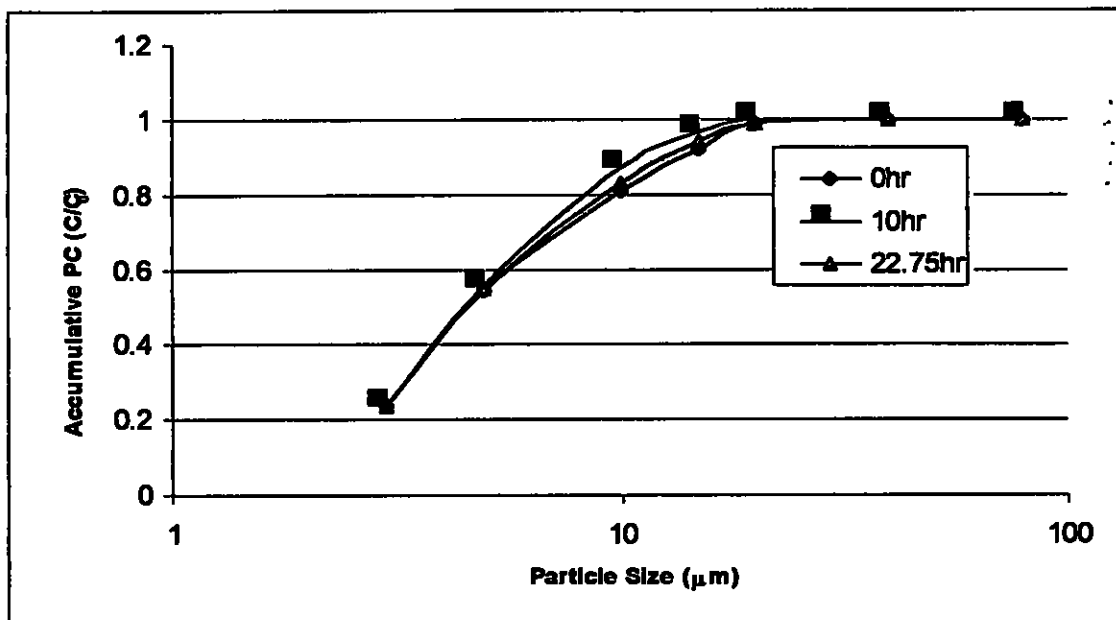
טבלה 4: נתוני התחלת ניסוי בשבע טחנות

TSS(mg/L)	VSS(mg/L)	Turbidity (NTU)	ζ	Potential (mV)	TPC ₀ per ml	Dominant Fraction
18	8 (TSS-מ 44%)	20		-23 ± 0.3	87,500	(31%) 3-5 μ m



ציור 17: TPC שארייתי ביממה הראשונה, שבע טחנות

לאחר כיממה נראה כי ברום העמודה התרחשה הרחקה מסוימת של חלקיקים, ששיאה כ- 50% ריכוז שארייתי בעומק 15 ס"מ, ובתחתית העמודה קיימת הצטברות חומר, כ- 130% בעומק 120 ס"מ. אך עדיין הרחקת החלקיקים אינה מלאה ונראה כי עמודת המים לא התייצבה. ה- PSD שנמדד ברום העמודה משתנה במהלך הניסוי (ציור 18).



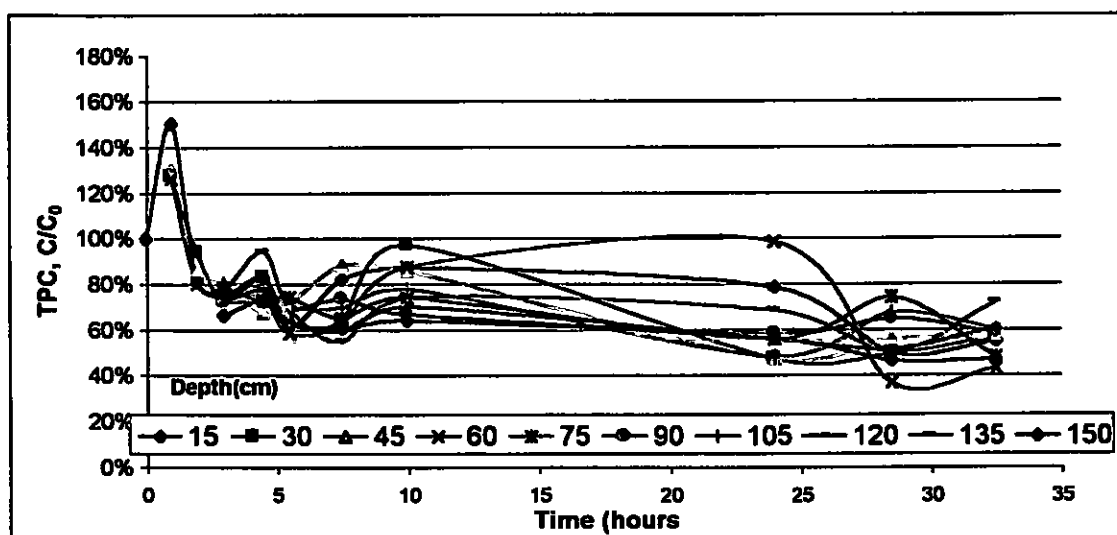
ציור 18 : שינוי ה- PSD לאורך הניסוי, שבע טחנות

מורד איילון – פברואר 2000

דיגום המים נערך במהלך ימי גשם, אשר קדם לו מזג אויר שמשי ונוח והמים הכילו אצות רבות. טבלה 5 : נתוני התחלת הניסוי במורד איילון

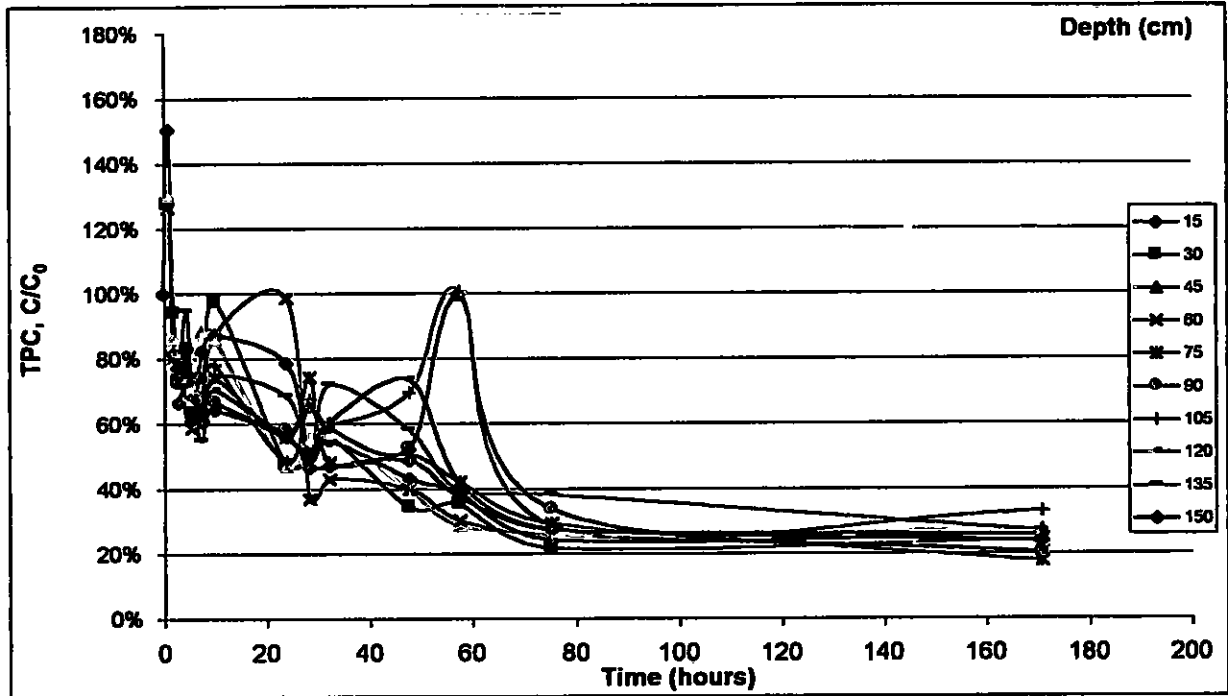
TSS(mg/L)	VSS(mg/L)	Turbidity (NTU)	ζ Potential (mV)	TPC ₀ per ml	Dominant Fraction
35	13 (TSS-מ 37%)	7.5	-10.7 ± 1.5	52,000	5-10 μm (42%)

השתנות שיעור ריכוז החלקיקים השארייתיים לאורך העמודה, במשך היממה הראשונה של ניסוי השיקוע מוצגת בציור 19 :



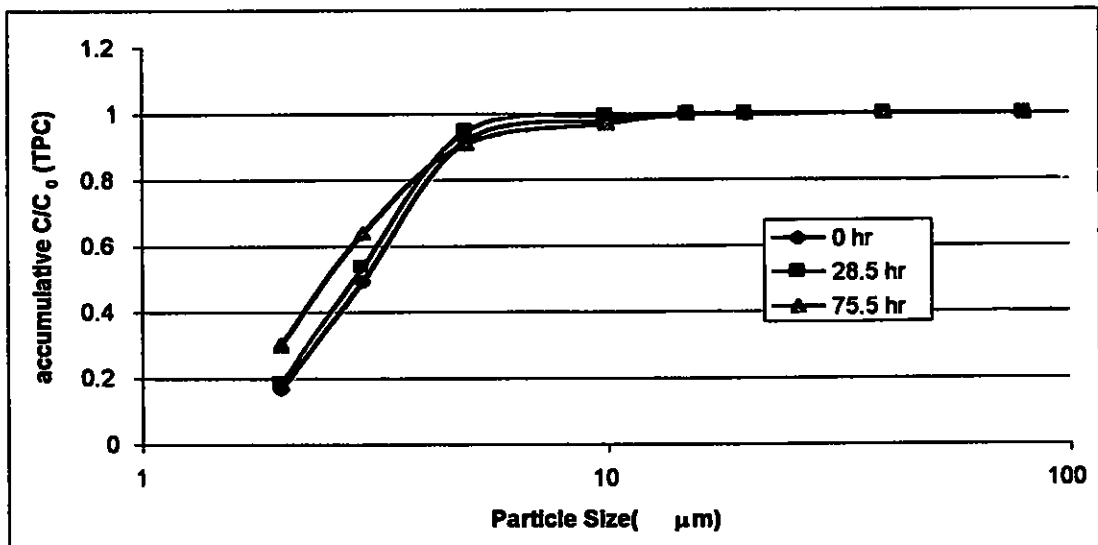
ציור 19 : TPC שארייתיים ב- 30 השעות הראשונות, מורד איילון

לאחר כ- 30 שעות שיקוע, ריכוזי החלקיקים השארייתיים לאורך העמודה פוחתים ונעים בתחום 40-70%. ירידה משמעותית יותר נראים לאחר שלושה ימים, כאשר הערכים מתייצבים סביב 30% (ציור 20).



ציור 20: TPC שארייתי לאורך הניסוי, מורד איילון

השתנות התפלגות גודלי חלקיק לאורך הניסוי בעומק 40 ס"מ מוצגת בציור 21. ניתן לראות בבירור כי עם התקדמות הניסוי עולה חלקה היחסי של הפרקציה הקטנה (2-3, 3-5 μm) ביחס לפרקציות הגודל הגדולות יותר (5-10, 10-15 μm).



ציור 21: שינוי PSD במהלך הניסוי, מורד איילון

4.3 תוצאות ניסויי שיקוע – חלק ב'

ניסוי זה נערך באופן שונה מעט מהניסויים הקודמים (כפי שמפורט בפרק שיטות וחומרים) וזאת כדי לספק מידע רב יותר על המתרחש בעמודת המים, במהלך השיקוע.

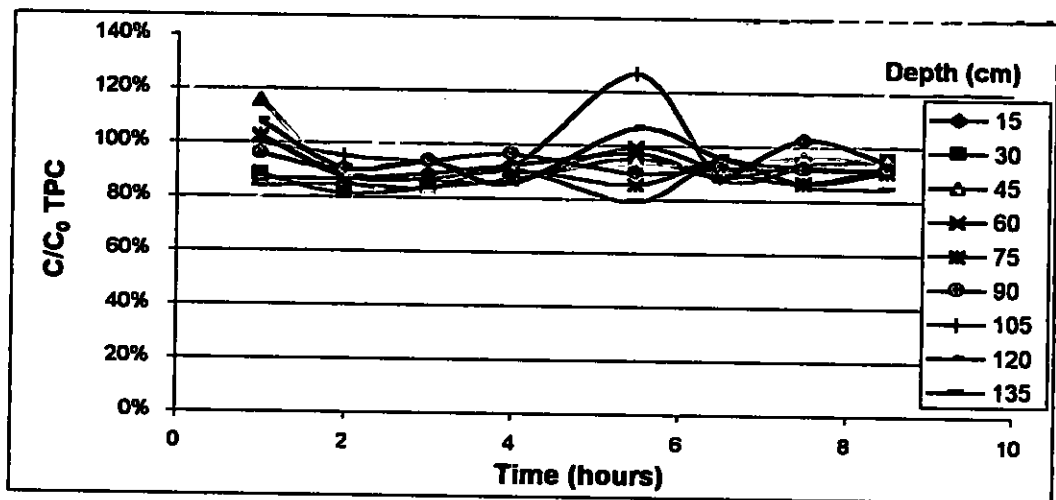
שבע טחנות – מאי 2000

הדגימה נלקחה במהלך ימי שמש ומזג אויר נוח. נתוני התחלה מוצגים בטבלה (6):

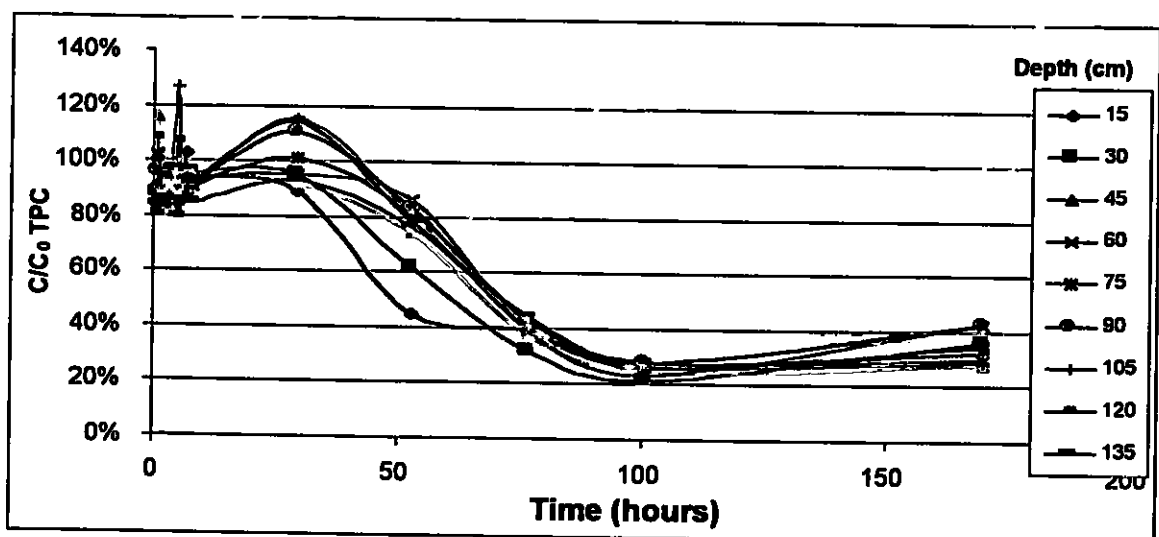
טבלה 6: נתוני התחלה, שבע טחנות

TSS (mg/L)	VSS (mg/L)	Turbidity (NTU)	ζ Potential (mV)	TPC ₀ per ml	Dominant Fraction	pH	Temp (°C)	Ionic strength
21.75	11.5	17.6	-20.0±-1.3	26361	3-5 μ m	8.19	23.1	0.0134

השתנות שיעור ריכוז החלקיקים השארייתי לאורך העמודה, במשך היום הראשון של ניסוי השיקוע (ציור 22) ובמשך כל הניסוי (ציור 23) מובאים להלן:

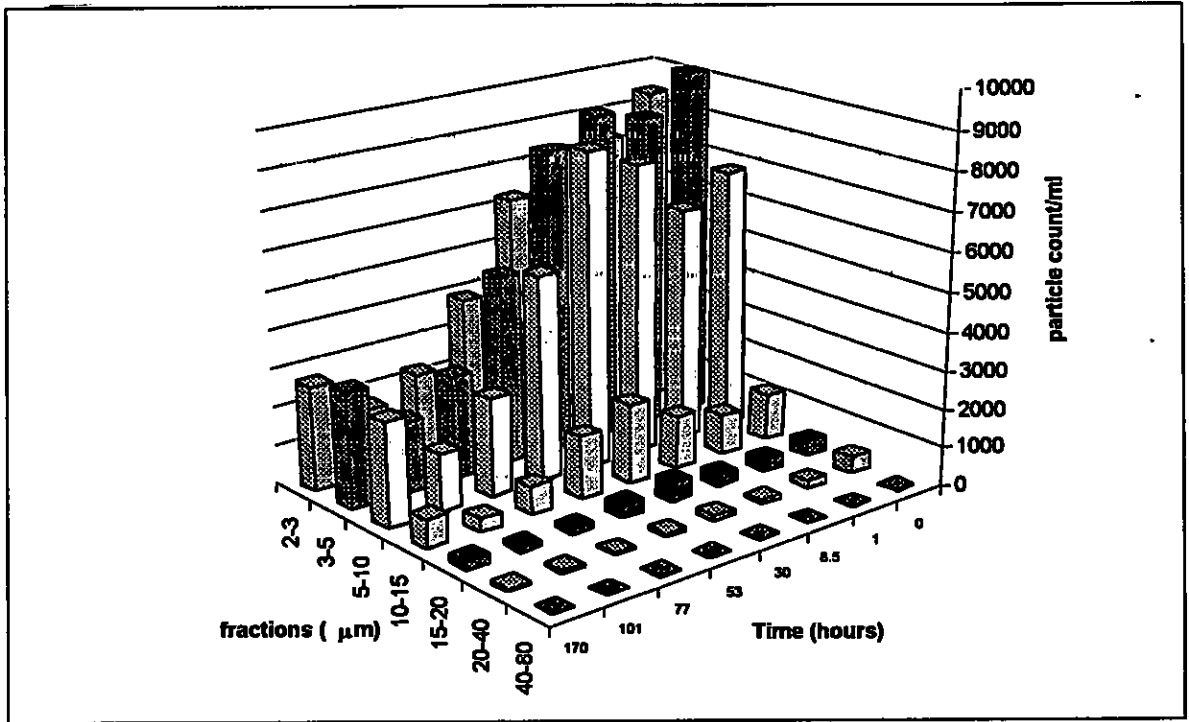


ציור 22: TPC שארייתי ביום הראשון של הניסוי



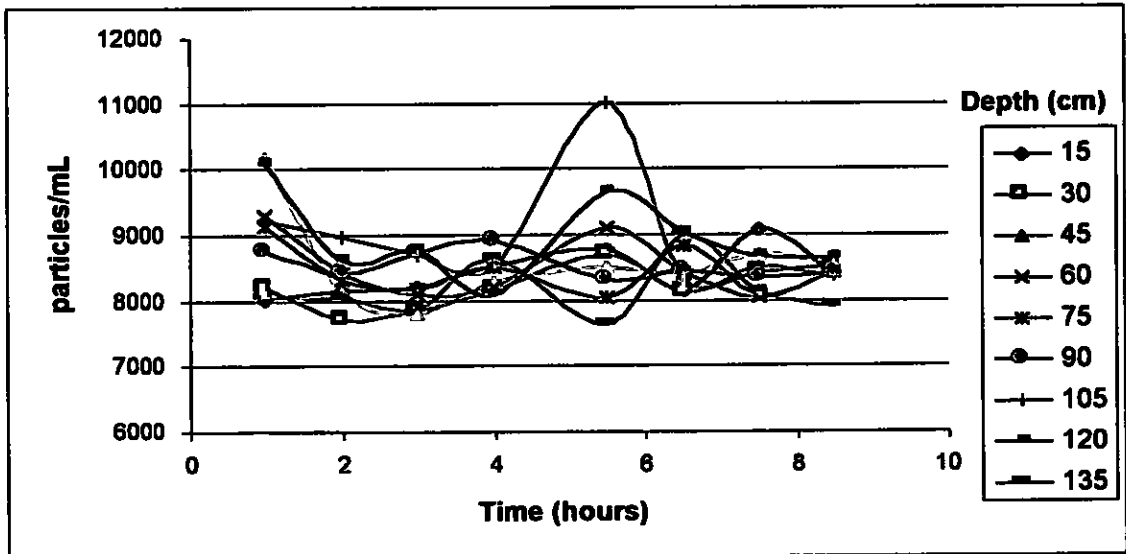
ציור 23: TPC שארייתי למשך כל זמן הניסוי, שבע טחנות

הציור הבא (24) מציג את התפלגות גודלי החלקיק במהלך הניסוי, בעומק 30 ס"מ:



ציור 24 : התפלגות גודלי החלקיק במהלך הניסוי, בעומק 30 ס"מ, שבע טחנות

הפרקציה העיקרית במהלך השיקוע היתה בד"כ 3-5 מיקרומטר. ציור 25 מציג את השתנותה במהלך הניסוי. הדמיון הרב בין גרף זה לציור 22 מדגיש את דומיננטיות הפרקציה בקרב החלקיקים.



ציור 25 : השתנות ריכוז הפרקציה 3-5 μm לאורך העמודה, ביום הראשון קובץ הנתונים שנאספו במהלך שיקוע החלקיקים ביום הראשון מוצגים בטבלה 7.

טבלה 7: נתונים מדגימות מים שונות במהלך הניסוי, שבע טחנות

תאריך	עומק (ס"מ)	זמן דגימה (שעות)	UV absorption	ζ potential (mV)	TSS (mg/L)	VSS (mg/L)	TPC /mL	עכירות (NTU)	PH
21.5	מקור	0	0.3024	-20+-1.3	21.75	11.5	26361	17.6	8.19
21.5	30	2	0.2956	-19.2+-1	13.5	9	21405	15.1	8.10
21.5	45	2	0.3027	-19.1+-0.8	15	10.5	22740	15.1	8.03
21.5	60	2	0.3098	-19.4+-1.2	16	8.5	23482	14.7	8.23
21.5	30	4	0.3138	-18.6+-0.5	7.5	7.5	22997	13.9	8.10
21.5	45	4	0.3170	-18.9+-0.6	12.5	8	23432	16.1	8.10
21.5	60	4	0.3127	-19.8+-1.3	14	9	22900	15.6	8.24
23.5	30	53	0.2481	-22.2+-1	5	5	16224	5.2	8.19
23.5	30 (מסונן)	53	0.2011	-10.9+-0.9					
25.5	30	101	0.2193	-22.7+-1.4	1		5592	3.1	8.16
25.5	120	101	0.2234	-19.8+-0.5	7.5		7289	3.6	8.06
28.5	30	170	0.2096	-21.1+-1.8	3		9461	2.7	8.10
28.5	30 (מסונן)	170	0.1915	-13.9+-1.2					

4.4 מעקב אחר שיקוע חומר אורגני

בדיגומים שנערכו ב- 23.7.2000, 5.8.2000 בתחנות אבו רבאח ושבע טחנות נאספו נתונים על החומר האורגני במי הנחל (טבלה 8):

טבלה 8: נתוני חומר אורגני בתחנות אבו רבאח ושבע טחנות

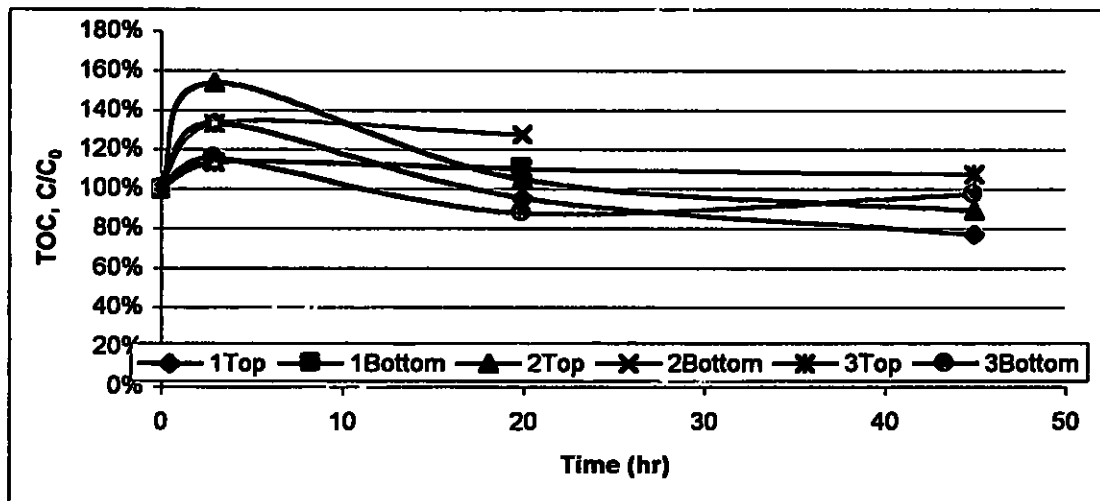
שבע טחנות מסונן	שבע טחנות	אבו רבאח מסונן	אבו רבאח	23.7.2000
	14		15.6	TSS (mg/L)
	8		6.4	VSS (mg/L)
9.6	9.2	3.6	3.7	TOC (mg/L)
0.2145	0.2588	0.0833	0.1171	UV(cm ⁻¹)
20.5	24	-24.6	-22	Zp (mV)
שבע טחנות מסונן	שבע טחנות	אבו רבאח מסונן	אבו רבאח	5.8.2000
	9.3	-	11.5	TSS (mg/L)
	8.4	-	4.7	VSS (mg/L)
9.34	7.85	-	2.4	TOC (mg/L)
0.2145	0.2711	-	0.0807	UV(cm ⁻¹)
	-22.3	-	-18.9	Zp (mV)
	497		42	Chlorophyll a (µg/L)

הנתונים הראשוניים מראים כי בתחנה שבע טחנות קיימים יותר מוצקים מרחפים נדיפים מאשר בתחנה אבו רבאח (8 ו- 8.4 מג"ל VSS בשבע טחנות לעומת 6.4 ו- 4.7 מג"ל VSS באבו רבאח), למרות שכלל המוצקים המרחפים באבו רבאח, רבים יותר. ביטוי נוסף לחומר אורגני רב יותר בשבע טחנות בערכי TOC, בליעת UV, ריכוזי כלורופיל a ואף בפיטוציאן זיטא שלילי יותר בשבע

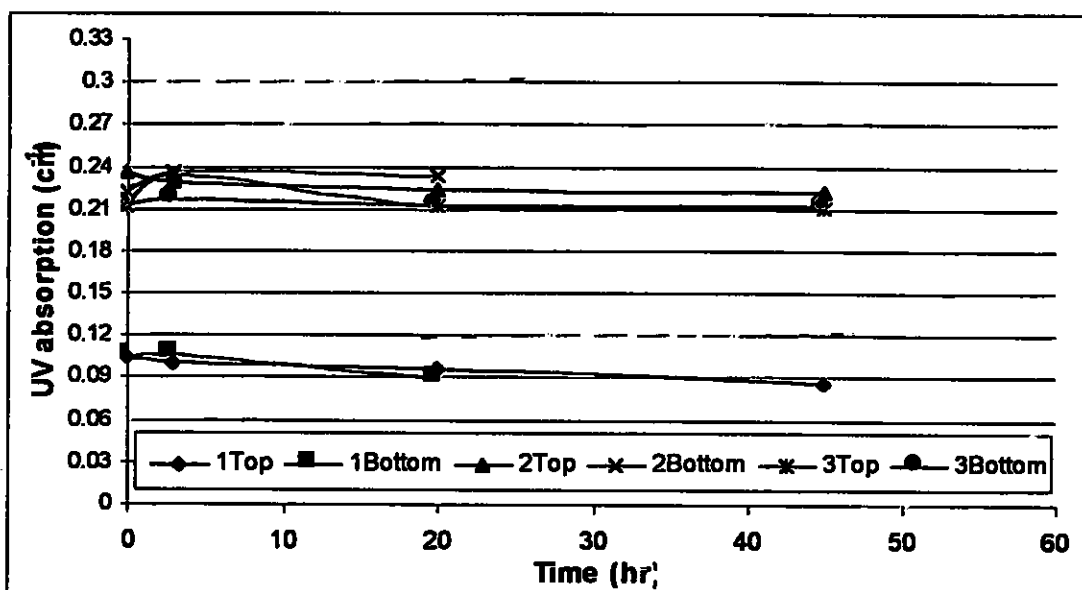
טחנות. כמו כן ניתן לראות כי הסינון הביא לירידת בליעת ה-UV ירידה של 17% ו-20% בשבע טחנות וירידה של כ-30% באבו רבאח), אולם באופן פרדוקסלי נתקבלו ערכי TOC גבוהים יותר לאחר סינון מי שבע טחנות.

מעקב אחר שיקוע החומר האורגני נערך בשלוש עמודות: מים מהתחנה אבו רבאח, מי שבע טחנות ומי שבע טחנות המסוננים. בציורים הבאים 1 מייצג את אבו רבאח, 2 מייצג את שבע טחנות ו-3 מייצג את שבע טחנות המסונן. דגימות נלקחו מרום העמודה ומתחתיתה ('Top', 'Bottom').

מעקב אחר שיקוע החומר האורגני לאורך הזמן בניסוי שנערך ב-25-27/7/00 באמצעות מדדי ה-TOC ובליעת ה-UV מראה בד"כ ירידה בריכוזים. ע"פ ציור 26 ניתן לראות כי ה-TOC ברום העמודה באבו רבאח יורד מהר יותר מאשר בשבע טחנות: לאחר 20 שעות שיקוע יש ירידה של 23% בעוד שבשבע טחנות יש ירידה של 11% בלבד. השינוי בבליעת ה-UV יותר קטן, אך בעל אותה מגמה (ציור 27): אחרי 20 שעות הערך באבו רבאח יורד ב-7% ובשבע טחנות ב-5%. בהמשך-45 שעות מתחילת הניסוי הירידה בשבע טחנות היא סך הכל של 6% ובאבו רבאח ירידה כוללת של 17%. הדיגום של רום עמודת המים המסוננים משבע טחנות מראה גם בנתוני ה-TOC וגם בנתוני ה-UV ירידה זניחה בערכי החומר האורגני ובליעת האור. דיגום בתחתית עמודות המים הראה כי באבו רבאח ובשבע טחנות הייתה עלייה והתייצבות על ערך TOC מסוים. לעומת זאת נתוני בליעת ה-UV היו שונים: באבו רבאח נראתה עלייה קלה של 2% לאחר 3 שעות שיקוע, אך ירידה של 15% לאחר 20 שעות. בשבע טחנות ב-20 השעות הראשונות, ירידה מתונה וקלה בשיעור בליעת האור.

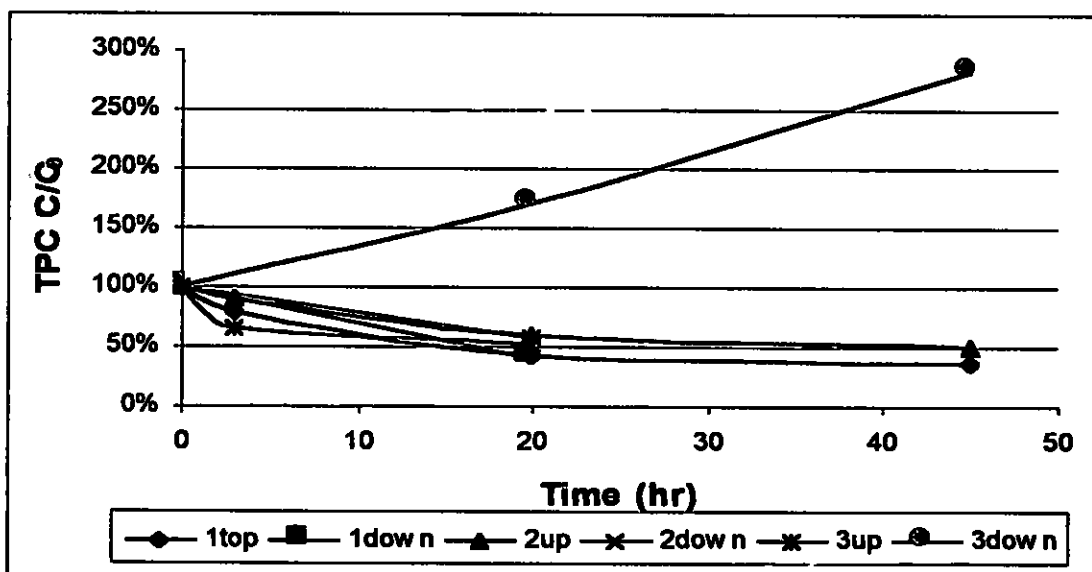


ציור 26: שינוי ה-TOC לאורך הזמן, 25-27/7/2000



ציור 27 : שינוי בליעת UV , 25-27/7/2000

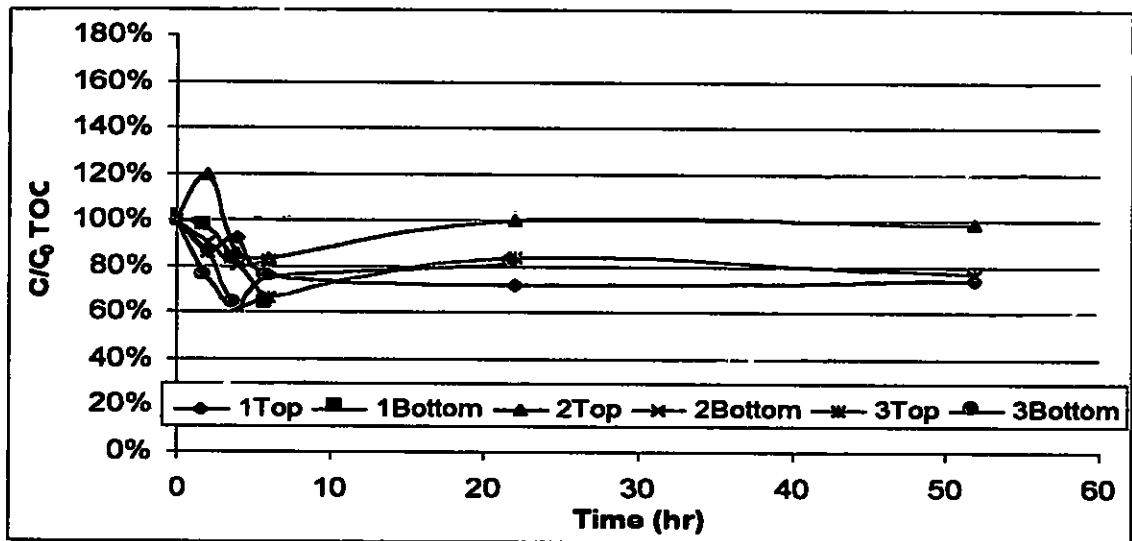
ריכוז החלקיקים ירד מהר יותר בתחנה אבו רבאח לעומת התחנה שבע טחנות וזאת לאורך כל הניסוי (למשל, לאחר 20 שעות ניסוי, ירד ריכוז החלקיקים באבו רבאח ב- 60% ובשבע טחנות הריכוז ירד 40%). מי התחנה שבע טחנות המסוננים הכילו כמובן הרבה פחות חלקיקים. במים אלו נמצא כי הירידה בריכוז ברום העמודה מהירה וכי בתחתית העמודה עלה הריכוז עם הזמן (ציור 28).



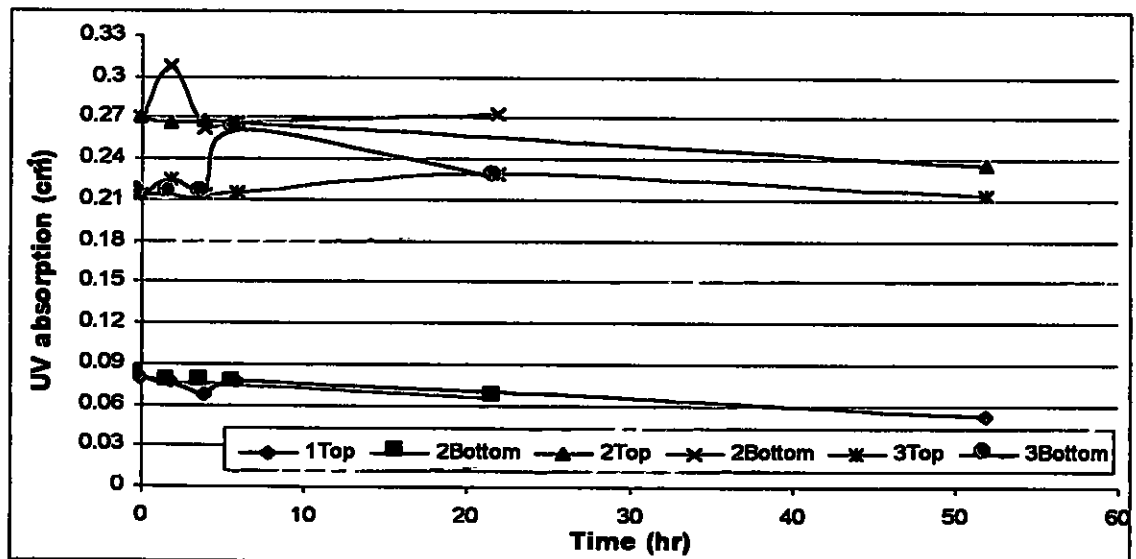
ציור 28 : שינוי ריכוז החלקיקים השארייתי עם הזמן, 25-27/7/2000

בתאריכים 5-8/8/2000 נערך ניסוי שיקוע חומר אורגני נוסף. ה-TOC ברום עמודת מי אבו רבאח ירד מהר מזה של שבע טחנות: לאחר 20 שעות נרשמה ירידה של 28% בעוד שהערך בשבע טחנות, לאחר פלוקטואציות בתחילת הניסוי, היה בזמן 20 שעות בערך המקורי וכך גם נמדד בסוף הניסוי. במי שבע טחנות המסוננים קטן ה-TOC ב- 20% לאחר 20 שעות שיקוע (ציור 29). בליעת ה-UV פחתה באבו רבאח בכ- 12% לאחר 20 שעות וב- 36% לאחר 52 שעות מתחילת הניסוי

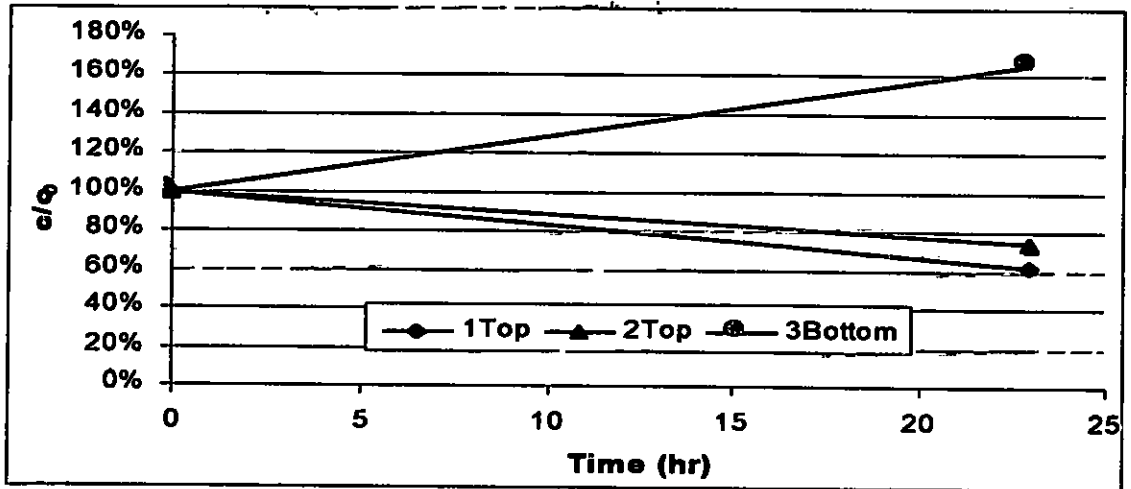
בשבע טחנות פחתה הבליעה בכ- 6% לאחר 20 שעות וב- 13% לאחר 52 שעות. במי שבע טחנות המסוננים אין ירידה משמעותית לאורך הזמן (ציור 30). בניסוי זה נלקחו מעט בדיקות TPC מסיבות טכניות. מציור 31 ניתן ללמוד כי במי אבו רבאח התקיים שיקוע מהיר יותר- 23 שעות לאחר תחילת הניסוי, חיתה הפחתה של כ- 40% מסך החלקיקים, בעוד שבשבע טחנות היתה הפחתה של 26%. במהלך ניסוי זה נלקחו מדידות פוטנציאל ζ (ציור 32). הערך שנמדד במי שבע טחנות יותר שלילי מאשר זה שבמי אבו רבאח. יש לציין כי שעתיים לאחר תחילת הניסוי נמדד בתחתית עמודת מי שבע טחנות ערך יוצא דופן - -13.3mV - שהוא פחות שלילי באופן ניכר מכל שאר הערכים שנמדדו בתחנות השונות לאורך הניסוי. לאורך הזמן הופכים הערכים ליותר שליליים בשתי עמודות המים. מי שבע טחנות המסוננים כמעט ואינם משנים את ערכיהם.



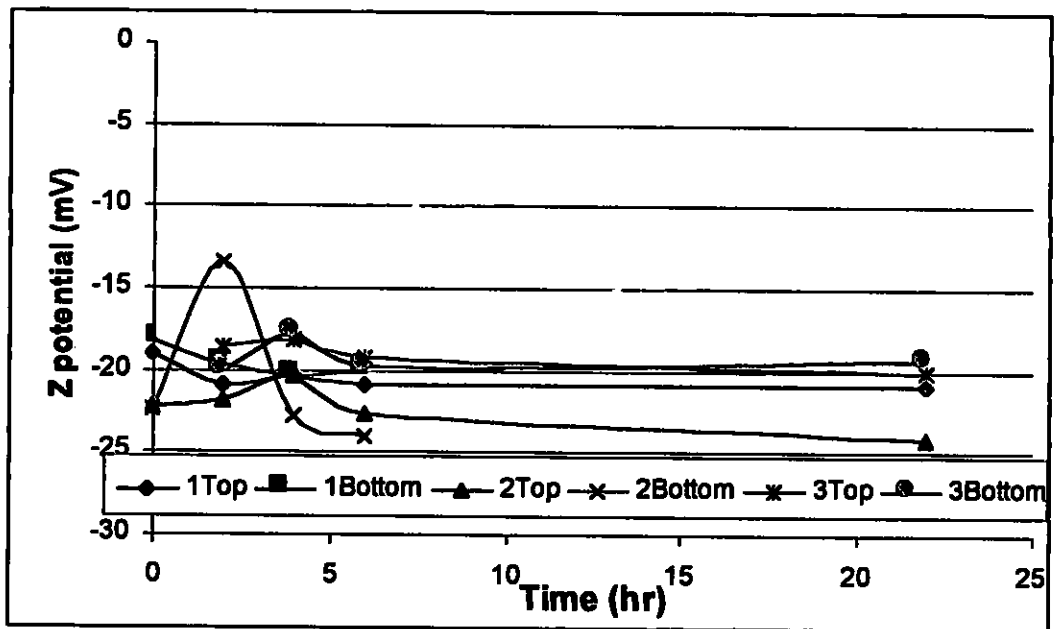
ציור 29: שינוי ה-TOC לאורך הזמן, 5-8/8/2000



ציור 30: שינוי בליעת UV, 5-8/8/2000



ציור 31 : שינוי TPC, 5/8/2000

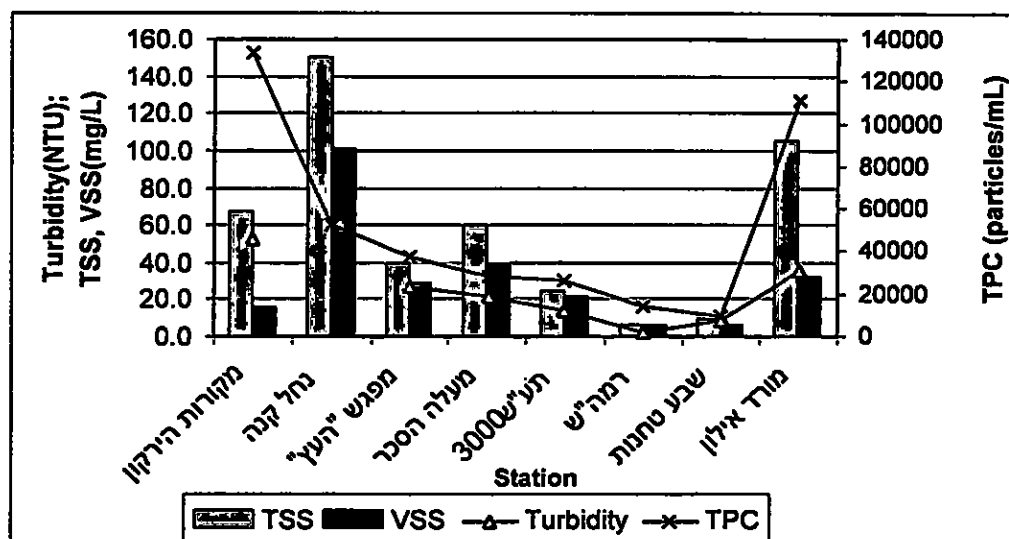


ציור 32 : שינוי פוטנציאל ז לאורך הניסוי 5-8/8/2000

5. דיון

5.1 אפיון רציף של הנחל

נראה כי בנחל קיימים תהליכים של טיהור עצמי מבחינת נתוני החומר המרחף (ציור 33). כניסות של חומר מרחף רב, מנרלי ואורגני במקורות הירקון, ובנחל קנה מאבדות מהשפעתן תוך כדי הזרימה ובמורדן נמדדים ערכים נמוכים בהרבה, למשל "מפגש העץ" הממוקם כ- 100 מטר מכניסת נחל קנה מכיל רק 26% מהמוצקים המרחפים בנחל קנה (יש לציין כי גם "רמה" מייצגת כניסת קולחין, אולם ברמה גבוהה, כך שהשפעה יכולה להיות רק חיובית). עליה של 50% בערך המוצקים המרחפים (TSS) בתחנה "מעלה הסכר" לעומת "מפגש העץ", מצביעה ככל הנראה על תהליכים של הרחפת חומר ששקע לקרקעית או בליית גדות הנחל. כך גם לגבי מורד אילון.



ציור 33: החומר המרחף לאורך הנחל, דיגום רציף, נובמבר 99.

5.2 ניסויי שיקוע חלק א'

- מתוך סדרת ניסויי השיקוע של מי התחנות השונות ניתן להפיק מספר מסקנות ביניים:
- תצפיות ניסויי השיקוע בתחנות השונות לאורך הנחל לא היו שונים באופן מהותי. בד"כ שיעור הרחפת החלקיקים לאחר 30 שעות לא בעל משמעות מעשית, אולם בכל זאת נראה היה כי קיימת הרחקה יחסית של חלקיקים בחלקה העליון של עמודת המים, והצטברותם בחלק התחתון.
 - התנהגות שיקוע החלקיקים לא נמצאה תמיד צפויה ופשוטה: בתחנות תע"ש 3000+ ומורד אילון נבחן השינוי ב- PSD לאורך כ- 75 שעות שיקוע ובהן נמצא כי התפלגות גודלי החלקיק ברום העמודה, השתנתה במהלך הניסוי כך שעלה חלקה היחסי של הפרקציה הקטנה, עם שיקוע הפרקציה הגדולה. אולם, בתחנות אבו רבאח ושבע טחנות בהן נערך ניסוי קצר יותר, כבן יממה, לא נמצאה רציפות בעליית פרקצית הגודל הקטנה. משמעות הדבר כי לפחות ביממה הראשונה של השיקוע, התהליכים יותר מורכבים מסכמה פשוטה על פיה חלקיקים גדולים שוקעים מהר ומפנים את גוף המים.

יחסית), שעיקרו ממי הקולחין ויש לצפות שעיקר הופעתו היא בחומר אורגני מומס, שנמצא כמייצב קולואידים וכמעכב קואגולציה והפתתה (Narkis and Rebhun, 1996).

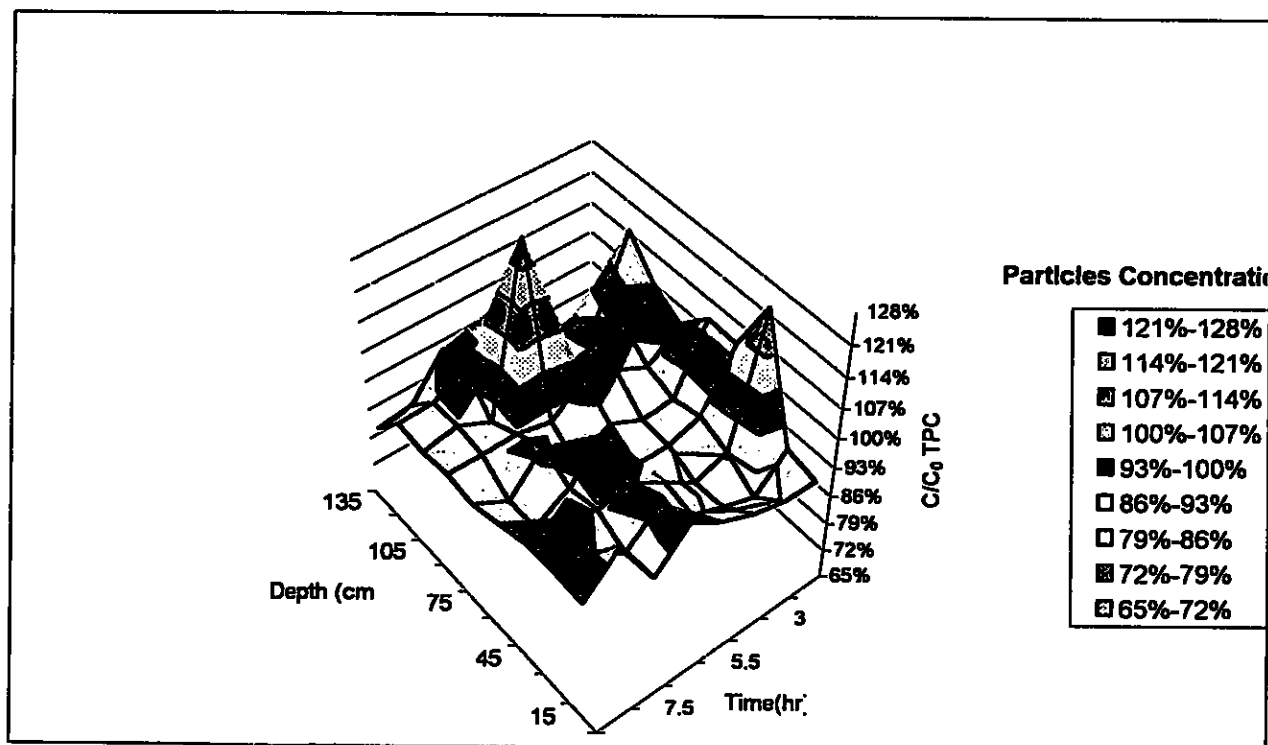
5.3 ניסויי השיקוע- חלק ב'

5.3.1 נתוני מי מקור

נתונים ראשוניים של מי המקור הצביעו על יציבות גבוהה יחסית של החלקיקים במי הנחל. הדבר בא לידי ביטוי בפוטנציאל ζ גבוה שלילית, ובחוזק יוני בינוני. כך גם TPC נמוך למדיי מקטין את הסתברות ההתנגשויות בין החלקיקים לשם הפתתה.

5.3.2 פלוקטואציות ריכוזי החלקיקים

ציור 34 מציג באופן תלת מיימדי את השינויים בריכוזי החלקיקים לאורך היום הראשון לאורך העמודה. מטרת הצגה זו, לסייע באיתור תנועת "גלים" של חלקיקים לאורך העמודה.



ציור 34 : שינויים בריכוזי החלקיקים לאורך היום הראשון לאורך העמודה, שבע טחנות

מתוך עיון בציור 34 ניכר כי לא קל להצביע על תהליכים פיזיקליים ברורים של שיקוע חלקיקים. הצטברות חלקיקים משמעותית שנצפתה בשעתו הראשונה של הניסוי בעומק 45 ס"מ במיוחד ורמות גבוהות של חלקיקים בעומקים 45-120 ס"מ בכלל, אינם ניכרים בשעה הבאה. 4.5 שעות לאחר מכן (זמן 5.5 ש') שוב עליה בעומק 45 ס"מ ואף יותר ממנה בעומק 60 ס"מ. באותו פרק זמן הריכוזים בעומקים 105-120 ס"מ נותרו גבוהים יחסית ובזמן 5.5 ש' מתחילת הניסוי יש שיא חלקיקים משמעותי מאד בעומק 105 ס"מ וכן בעומק 120 ס"מ.

לשם הבנת התופעות נערך עיון בנתוני התפלגויות גודלי החלקיקים בעומקים האמורים בזמן שיא, בשעה שקדמה לה ובשעה שלאחריה. הטבלה הבאה (טבלה 9) מציגה את הנתונים:

• בכל ניסויי השיקוע נצפו פלוקטואציות בריכוזי החלקיקים לאורך העמודה, כלומר עליות וירידות בריכוז במקום מגמת ירידה קבועה. תופעה זו הייתה נכרת ביום הניסוי הראשון והלכה והתמעטה בהמשך הניסוי. סיבות אפשריות לתופעה זו:

- היבט ביולוגי: המים מכילים מיקרואורגניזמים בכלל ואצות בפרט, תנאי המעבדה (אור, טמפי' חדר) יכולים היו לעודד פריחות של אצות. יתכן ופריחות אלו ליוו שיקוע נוטריינטים במים. כמו כן, יש לזכור כי למיני אצות שונים יכולת תנועה במים.
- היבטים פיזיקליים: * שיקוע חלקיקים בעלי גודל ומשקל סגולי שונים יהיה במהירות שונה, לפי נוסחת Stokes. עובדה זו יכולה להסביר את התופעה בכך שבנקודות זמן שונות, מאז תחילת השיקוע, מצטברים חלקיקים רבים באותו עומק באופן מיקרי, וכך גם הם נפרדים וממשיכים בדרכם. * תהליכי הפתחה/ הנתקות של חלקיקים. * כוח פיזיקלי נוסף שיתכן ויש לו תפקיד במערכת זו, הוא כוח הגרר (Drag force). יתכן ושיקוע של מסי' חלקיקים רב באותו העיתוי, מלווה בעליית מים, שתופסים את מקומם, ואגב כך מעכבים את שיקועם של חלקיקים אחרים משכבת מים עליונה יותר.

• השוואה בין התחנות אבו רבאח ומורד איילון יכולה לסייע בפירוש התהליכים הפיזיקו כימיים בעמודת המים. כאמור, התחנה אבו רבאח ממוקמת סמוך למקורות הירקון, והמים בה מוגדרים מתוקים ונקיים. בד"כ נמצאה התחנה עניה יחסית בחומר אורגני חלקיקי. התחנה מורד איילון מכילה ערבוב של מי הנחל עם מי הים והמים בה מלוחים ומזוהמים. בניסויי השיקוע לא נמצא שוני רב בין שתי התחנות בשיעור הסרת החלקיקים לאחר כ- 30 שעות (תחום ריכוזי החלקיקים השארייתי דומה, כ- 35%-70%). למעשה ניתן היה לצפות לשיקוע מהיר יותר במורד איילון, משום תנאי קואגולציה והפתחה טובים יותר:

- ערבוב עם מי הים, בתחנה מורד איילון, מקנה למים חוזק יוני גבוה יותר, המעודד את דחיסת השכבה החשמלית הכפולה, ומקל על התקרבות חלקיקים (Amirtharajah and O'Melia, 1990);

- המים הכילו ריכוז אצות גבוה יחסית למי אבו רבאח. אצות מפרישות פוליסאכרידים המשמשים כביופלוקולנטים (Avnimelech et al., 1982).

- פוטנציאל הזיטא, שנמדד במי מורד איילון היה נמוך שלילית (-10mV) ביחס לאבו רבאח, שם היה גבוה שלילית (-20mV) דבר המעיד כי במורד איילון קיים פוטנציאל דחיסה יחסית של השכבה החשמלית הכפולה (Amirtharajah and O'Melia, 1990), ומעודד קואגולציה והפתחה.

גורם שפעל נגד סיכויי הפתחה גבוהים יותר במורד איילון הוא העובדה כי ריכוז החלקיקים בו נמוך כמעט פי שניים מזה של אבו רבאח, דבר המקטין את הסתברות התנגשות החלקיקים. נקודה חשובה נוספת היא היות מי איילון צפופים יותר, משום ערבובם עם מי הים, והמשתמע מנוסחת Stokes הוא כי מהירות שיקועם צפויה להיות איטית יותר.

מעבר לכל זאת, נראה כי ההבדל העיקרי בין התחנות, הוא הרכב המים: מי אבו רבאח נקיים יחסית מחומר אורגני חלקיקי ואף מומס, שכן כניסת מי הקולחין לנחל מתרחשת במורד התחנה. מי מורד איילון לעומת זאת מכילים חומר אורגני רב (למרות שנדגם VSS נמוך

טבלה 9: PSD בעומקים 90-120 ס"מ בזמן שיא ריכוז חלקיקים, שבע טחנות

עומק (ס"מ)	זמן (שעות)	מס' חלקיקים למ"ל							סך חלקיקים
		פרקציות הגודל (μm)							
		2-3	3-5	5-10	10-15	15-20	20-40	40-80	
90									
	4.5	7766	8917	7142	1132	318	127	3	25409
	5.5	7313	8326	6665	1019	257	111	4	23701
	6.5	7414	8449	6916	1070	269	90	1	24216
105									
	4.5	7460	8527	6654	1038	307	151	8	24148
	5.5	8914	11012	10633	2607	556	221	8	33956
	6.5	7280	8323	6521	937	217	77	1	23363
120									
	4.5	7218	8095	6032	868	225	95	6	22543
	5.5	8133	9661	8229	1442	418	196	5	28088
	6.5	7856	9016	7041	1009	252	90	2	25271

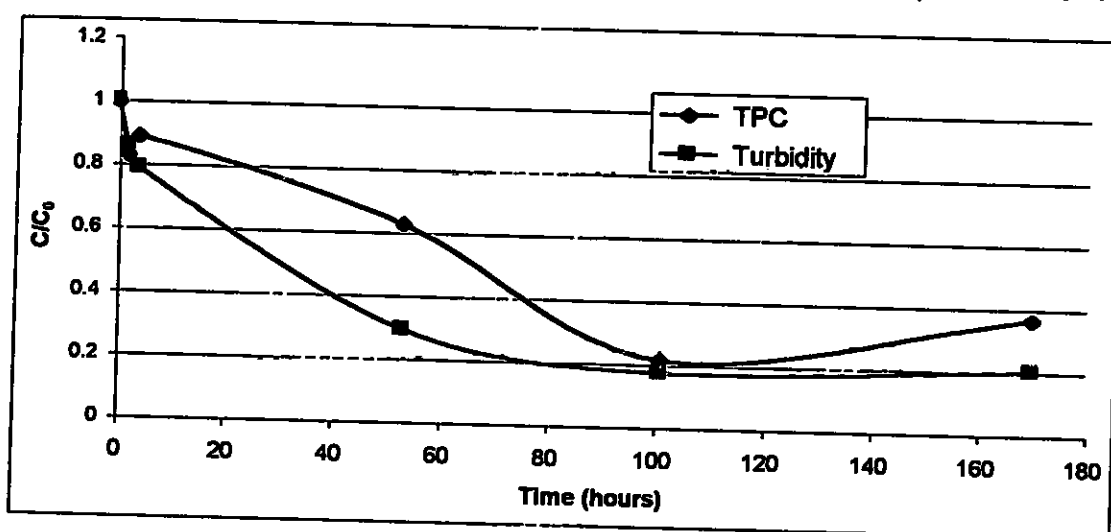
בעומק 90 ס"מ נצפתה הפחתה במס' החלקיקים בין השעה 4.5 לשעה 5.5 בשיעור של כ- 7% בטווח הגודל $2-10 \mu\text{m}$ ו- 10% ירידה בפרקציה $10-15 \mu\text{m}$. הפרקציות $15-20 \mu\text{m}$ ו- $20-40 \mu\text{m}$ פחתו ב- 20% ו- 13% בהתאמה. לעומת זאת שיעור עליית מספר החלקיקים בזמן זה, בעומקים בהם נרשם שיא במספרם (עומק 105-120 ס"מ) גדול הרבה יותר: בעומק 105 ס"מ חלה עליה של 20% בפרקציה $2-3 \mu\text{m}$, 30% בפרקציה $3-5 \mu\text{m}$, כ- 55% עלייה במס' החלקיקים למ"ל בטווח הגודל $5-15 \mu\text{m}$ ובפרקציות $15-20 \mu\text{m}$ ו- $20-40 \mu\text{m}$ נצפתה עלייה של 46% ו- 81% בהתאמה. בעומק 120 ס"מ העלייה פחות דרמטית (בטווחי הגודל העיקריים), אך עדיין גבוהה: 12% בפרקציה $2-3 \mu\text{m}$, 19% בפרקציה $3-5 \mu\text{m}$, כ- 40% בטווח הגודל $5-15 \mu\text{m}$, 86% עלייה בפרקציה $15-20 \mu\text{m}$ ולמעלה מ- 100% בפרקציה של $20-40 \mu\text{m}$. כעבור שעה נוספת של שיקוע (זמן 6.5 ש'), נמצא כי בעומק 105 ס"מ שיעור הפחתת ריכוז החלקיקים גדל עם העלייה בקוטר החלקיק וחלקיקים בקוטר $10-40 \mu\text{m}$ היו בריכוז הנמוך בכ- 60%. בעומק 120 ס"מ המגמה זהה- ירידה בריכוז החלקיקים גדלה עם העלייה בקוטר החלקיקים.

5.3.3 נתונים השוואתיים :

א. עכירות ו-TPC

ציור 35 מציג השוואה בין העכירות השארייתית לריכוז החלקיקים השארייתי לאורך הניסוי. אומנם המגמות דומות, אולם העכירות השארייתית פוחתת מהר יותר מריכוז החלקיקים השארייתי. עכירות מודדת נוכחות חלקיקים בגדלים שונים בדוגמת המים, כאשר הקולואידים הם הגורם העיקרי לעכירות. ריכוז החלקיקים בטווח הקריאה של מונה החלקיקים $2-80 \mu\text{m}$ לא

פחת משמעותית (כפי שמשמע ממגמת הירידה המתונה יחסית של עקום ה-TPC), כך שאת הירידה המשמעותית של העכירות ניתן להסביר באמצעות הרחקת הקולואידים מהמים. מאחר ולפי כל נוסחאות השיקוע לא יתכן שיקוע קולואידים לפני חלקיקים גדולים וכבדים יותר הרי שכל הנראה הרחקת קולואידים מהמים מתבצעת ע"י תהליכי הפתתה. משתמע מכך כי ריכוז פרקציית גודל כלשהי, בזמן נתון בדוגמת מים, יהיה מורכב מחלקיקים יציבים שנותרו מנק' זמן קודמת, חלקיקים ששקעו לנק' ממנה נלקחת דוגמת המים וחלקיקים שנוצרו ע"י קואגולציה והפתתה של חלקיקים מפרקציות גודל קטנות יותר (חלקיקים ש"יעדרו" מסכימה זו יהיו חלקיקים ששקעו וחלקיקים 'לא יציבים' שעברו קואגולציה והפתתה עם חלקיקים אחרים וכך יתקיימו כחלקיקים בפרקציית גודל גדולה יותר. ההפך נכון לגבי צברים שהתפרקו). במערכת טבעית רכיב נוסף יהיה תוספת חלקיקים שהורחפו מהקרקעית.



ציור 35: עכירות שארייתית ו-TPC שארייתית לאורך הניסוי, עומק 30 ס"מ, שבע טחנות.

עיון בתוצאות התפלגות גודלי החלקיק (ראו ציור 24, נספח 2), בזמנים שונים (1 שעה, 8.5, 30, 53 ו-77 שעות) בהם ניכר השוני בין העכירות ל-TPC, בעומק 30 ס"מ, מראה כי הפרקציה $2-3 \mu\text{m}$ אינה גדלה באופן יחסי אלא אף פוחתת, כך גם הפרקציה $3-5 \mu\text{m}$. לעומתן הפרקציה $5-10 \mu\text{m}$ גדלה כבר בזמן 8.5 שעות עד כדי היותה בשיאה בזמן 30 שעות ושומרת על ערך גבוה גם 77 שעות לאחר תחילת השיקוע. גם הפרקציות $10-15 \mu\text{m}$, $15-20 \mu\text{m}$ ו- $20-40 \mu\text{m}$ נמצאות בשיאן המספרי 30 שעות לאחר תחילת השיקוע (אף ריכוז הפרקציה $40-80 \mu\text{m}$ עולה מעט, אך משום מספר חלקיקים נמוך מאד בפרקציה זו, קיים חשש לשגיאה סטטיסטית).

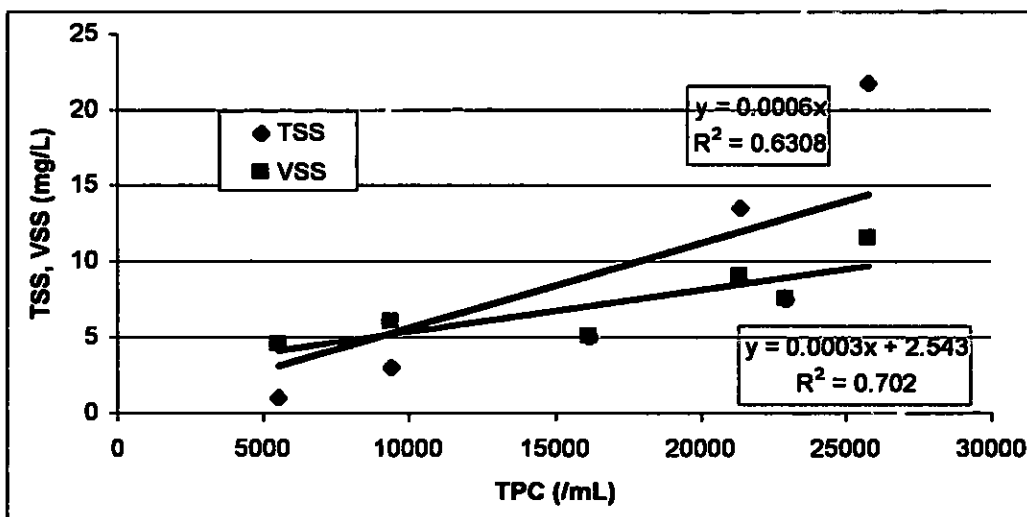
מתוך כך מסתמן כי הרחקת קולואידים מהמים לא הובילה ליצירת חלקיקים קטנים מהפתתת קולואידים רבים (דבר שהיה מתבטא בעליית ריכוז הפרקציה $2-3 \mu\text{m}$) אלא הצטברות קולואידים על פני חלקיקים גדולים יחסית ($> 5 \mu\text{m}$) שכבר קיימים והשפעה על גידול פרקציה כלשהי בתחום זה.

העובדה כי חלקיקים גדולים הראו יציבות יחסית במים הצריכה את אפיונם. קיימות שתי אפשרויות עיקריות להסבר תצפית זו: 1. תהליך הקואגולציה וההפתתה של הקולואידים עם

החלקיקים הגדולים יותר היה מלווה ביצירת קומפלקסים עם מולקולות מים, דבר שהביא לירידת הצפיפות היחסית של הצבר כולו (תהליך המתואר ע"י Font et al. (1994); 2. משקל סגולי של החלקיקים המבצעים את ההפתה: מתוך השוואת נתוני TSS ו-VSS, נמצא כי לאחר שעה, ירד ערך ה-TSS השארייתי (TSS/TSS_0) (62%) יותר משריד ערך ה-VSS השארייתי (78%) והמגמה בולטת גם בשעות 8.5 ו-5.3. כך שקיימת אפשרות כי חלקיקים אורגניים וקולואידים אורגניים היו מעורבים בתהליכי ההפתה שתוארו וכך תרמו ליציבות ה-VSS ובהיותם בעלי מהירות שיקוע נמוכה מאד (ראו סעיף 5.3.4 ניתוח המודלים המתמטיים) מוסרים מגוף המים בקצב איטי ביותר.

ב. מוצקים מרחפים וריכוז חלקיקים למ"ל

ציור 36 מתאר תוצאות דגימות המים מעומק 30 ס"מ, לאורך הניסוי. נמצא קשר ליניארי טוב יותר בין ה-VSS לבין ה-TPC, לעומת ה-TSS. הסבר לכך יכול להיות מצוי בעובדה כי במהלך הניסוי הרכב החומר המרחף משתנה: חלקיקים מינרליים (FSS) שוקעים יותר מהר ושיעורם ב-TSS פוחת. עד כדי כך שלקראת סוף הניסוי (בערכי TPC נמוכים) עיקר המוצקים המרחפים הוא אורגני (אצות) ואף בעל יכולת התרבות.. (פריחת אצות), והם אלו שמשפיעים ישירות על ריכוז החלקיקים (במגבלות מונה החלקיקים ל"קריאת" אצות, ראו נספח 5).



ציור 36 : TPC לעומת TSS, VSS, בעומק 30 ס"מ, שבע טחנות

ג. מוצקים נדיפים ורמת ההגבה

הבסיס להשוואה בין ה-VSS ל-pH, היא ההנחה כי נוכחות ריכוז גבוה של אצות בגוף מים תבוטא במוצקים הנדיפים וכן ברמת הגבה גבוהה עקב צריכת פחמן דו חמצני. עיון בנתוני טבלה 7 שולל מציאת קשר כזה עקב התאמה גרועה בין התוצאות. הסיבה העיקרית לכך נעוצה ביכולת הבופר של התמיסה: בעת חישוב החוזק היוני, נערכה מדידת אלקליניות, שנמצאה גבוהה ביותר: כ-197 מג"ל. מערכת הקרבונט המצויה במים מאזנת שינויים בריכוזי המימן, ע"י מעבר בין צורוני הקרבונט. סיבות אפשריות נוספות להעדר ההתאמה בין ה-VSS לרמת ההגבה, הן קיום אצות קטנות במיוחד שאינן תורמות לעלייה ברורה במוצקים הנדיפים (VSS). מאחר ולא נערך אפיון

מיני האצות בניסוי זה ובוודאי שלא עבור דגימות מים שונות במהלכו, הרי שלא ניתן לאושש או להפריך אפשרות זו. שגיאת מכשיר ה-pH עלולה לסכל גם היא השוואה כזו.

ד. נתוני דגימות מים משלושה עומקים רצופים

בשעה השניה והרביעית של השיקוע נלקחו מדידות נוספות לשם הרחבת מאגר הנתונים לגבי העומקים 30, 45 ו-60 ס"מ (ראו טבלה 7). בפעם הראשונה (בשעה השניה לשיקוע) נמצא כי ה-TPC עולה עם העומק, למרות שהעכירות יורדת. יתכן ושוב רואים את התופעות שדובר בהן בסעיף 5.3.3 א' (השוואת העכירות ל-TPC): קולואידים הוסרו מהתמיסה ע"י הפתתה. שיא TSS בטווח העומק 30-60 ס"מ היה בעומק 60 ס"מ, בעוד ששיא ה-VSS היה בעומק 45 ס"מ (מוסבר ע"י שיקוע איטי של מרכיבי ה-VSS). בליעת ה-UV הגבוהה ביותר נמצאה בעומק 60 ס"מ ומצביעה על מיקום החומר ההומי (שינוי בערך פוטנציאל ζ נמוך מכדי לשמש כביטוי ממשי). העובדה שגם שיא ה-TPC מתלכד עם שיא ה-TSS, בניגוד לשיא ה-VSS, יכולה להצביע על היות אותו חומר אורגני שנמדד ע"י בליעת UV בעומק 60 ס"מ, מומס בעיקרו ולא חלקיקי. בפעם השניה שנאספו מגוון הנתונים (בשעתו הרביעית של הניסוי) נמצאה מגמת עלייה מסויימת עם העומק בין ה-VSS ל-pH ולפוטנציאל ζ . מגמה זו יכולה להיות מוסברת ע"י נוכחות אצות שמעלות את ה-pH וכן את ערכו האבסולוטי של פוטנציאל ζ . לעומת זאת לא נמצאה קורלציה טובה במיוחד בין ה-TSS ל-TPC (כפי שתואר בסעיף ב'): עם התקדמות הניסוי חלקיקים מינרליים מפנים מהר יותר את עמודת המים וכן יתכנו פריחות אצות).

חשוב לציין כי למרות כל הנאמר, יש לקבל בהסתייגות מסוימת את השימוש בחלק מהנתונים: נתוני פוטנציאל ζ היו בעלי טווח שגיאה גבוה והשינוי שנמדד בדגימות המים השונות לא תמיד עבר את טווח השגיאה. בליעת UV משתנה מעט לגבי דגימות מים בטווח זמן מצומצם יחסית. למרות שניתן ביתר קלות להשתמש בנתון זה עבור השוואת מדידות מימים שונים, או מתמיסה מסוננת ושאינה מסוננת (דבר התקף גם לגבי מדידת פוטנציאל ζ ויפורט בסעיף הבא).

ה. נוכחות חומר אורגני כתלות בסינון

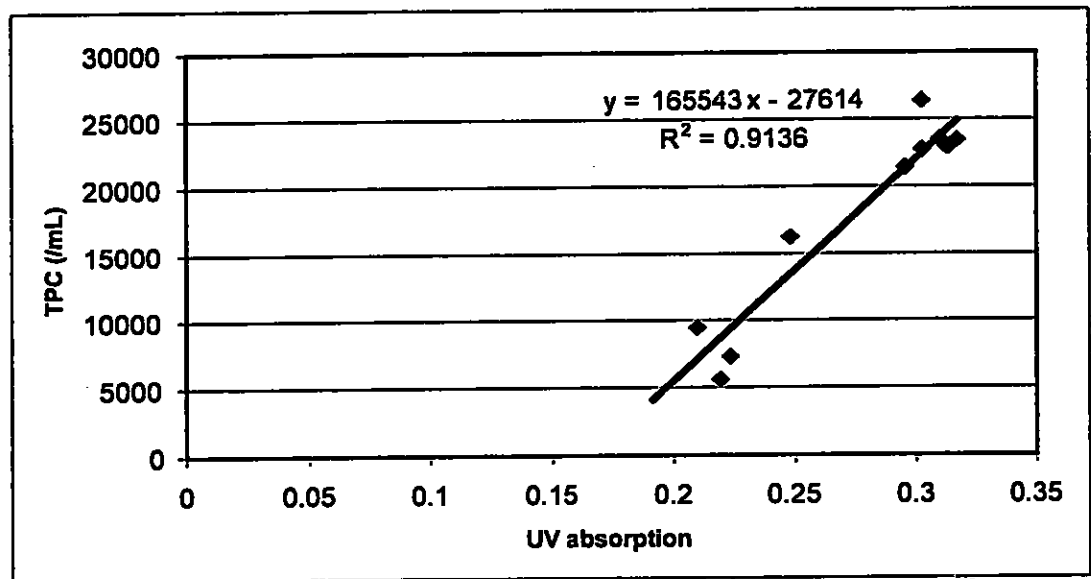
בשני מקרים סוננה דוגמת המים מעומק 30 ס"מ (סינון בפילטר $1.2\mu\text{m}$), ונמדדה בליעת ה-UV ופוטנציאל ζ לפני ואחרי הסינון. בליעת אור מושפעת מ"רעש" רקע בעת נוכחות קולואידים כלשהם במים (גם ללא נוכחות חומר אורגני). משום כך המדידות של התרחיף הלא מסונן מושפעות מ"רעש" רקע זה, עובדה שיש לזכור בעת השוואת התוצאות. בתאריך ה-23.5.00 נמדדה בליעת UV של 81% לאחר הסינון, ביחס לבליעה לפני הסינון. תוצאות פוטנציאל ζ הראו כי הסינון הביא לירידה משמעותית של 51% מהערך לפני הסינון (אחרי הסינון נמדד -10.9mV במקום -22.2mV לפני) בתאריך 28.5.00 בליעת האור לאחר הסינון היא 91.4% ופוטנציאל ζ פחת הפעם לכדי 66% מהערך לפני הסינון.

נתוני בליעת האור מצביעים על מספר דברים: החומר האורגני נמצא ברובו בתמיסה ולא כספוח על חומר חלקיקי ובכל זאת יש לחומר הספוח על החלקיקים משקל של כ-10-20% מכלל החומר האורגני (במגבלת גורמי עכירות כאמור); לאחר מספר ימי שיקוע, משתנה חלוקת החומר האורגני

והוא נמצא בשיעור גבוה יותר כמומס בתרחיף. הדבר מוסבר ע"י פינוי המים מחלקיקים נוספים ע"י שיקועם, כך שריכוז החלקיקים קטן והשפעתם פוחתת; השוואת בליעת האור בין שני הימים מראה כי התרחיף הלא מסונן מכיל 85% מהחומר האורגני, שהיה בו (שינוי הנובע בוודאי משיקוע חלקיקים סופחים), בעוד שהתסנין הכיל 95% ביחס לערך בתסנין יומיים לפני כן. הדבר יכול להצביע על תהליכים כלשהם שעובר החומר האורגני במים: למשך; ספיחה והסעה. השוואת ערכי ה-TPC בין שני הימים, מורה על שינוי של כ- 58% בריכוז החלקיקים.

1. השפעת החומר האורגני על יציבות החלקיקים

בדיון בניסויי השיקוע- חלק א' (סעיף 5.2), הועלתה השפעתו המייצבת של החומר האורגני על החלקיקים. ציור 37 המבוסס על נתוני טבלה 7 מדגים באופן טוב קשר ליניארי בין נוכחות החומר האורגני לבין ריכוז החלקיקים הכללי. יש מקום להזכיר שוב את "רעש הרקע" של הקולואידים המעלים את ערך הבליעה אולם מדובר על השפעה ולא על עיקר הבליעה.



ציור 37: ריכוז החלקיקים ובליעת UV, שבע טחנות

5.3.4 שימוש במודלים מתמטיים

א. חישוב מהירות השיקוע

לשם חישוב מהירות השיקוע הונחה מערכת בה הזרימה היא למינרית. הנחה זו מתאימה לניסויי המעבדה, בהם המים עומדים ואף לתנאי השטח, משום הזרימה האיטית של מי הירקון.

טבלה 10 מציגה מספר תוצאות חישוב:

1. חישוב ע"פ נוסחת Stokes (נוסחא מס' 2).
2. "תיקון לפי צורה" (נוסחא מס' 7) - ניתוח צורת החלקיקים שהובא בדו"ח הקודם מראה כי החלקיקים בשבע טחנות אינם מאופיינים בכדוריות טובה (בניגוד להנחת חוק Stokes) אלא בנטייה לאלטיפסואידליות ולצינוריות ולכן הוחלט על חישוב ע"פ הנוסחה המתוקנת של חוק Stokes. לשם חישוב מקדם הצורה E נלקחו מדידות הקוטרים כפי שהובאו בדו"ח הקודם.

3. "קיצור דרך" (נוסחא מס' 9) - מערכת המשוואות שפותחה ע"י Bhargava and Rajagopal (1992) לשם פישוט השימוש בנוסחאות הרגילות (במצב בו מספר ריינולדס אינו ידוע), נבדקה גם היא והתוצאות מובאות לשם השוואתם עם תוצאות חישובי Stokes בתנאי זרימה ידועים.

הערות:

- הנחת חוק Stokes היא שיקוע יחידני (discrete), ויש לזכור זאת בעת עיון בתוצאות. שיקוע בתנאים האמיתיים אינו מאולץ כמובן להנחה זו.
- נבדקו מהירויות השיקוע של ארבע פרקציות הגודל העיקריות: 2-3, 3-5, 5-10, ו-10-15 μm .
- גודלי החלקיק נלקחו בד"כ כממוצע של טווח הגודל.
- הנתונים הכמותיים בהם נעשה שימוש הם:

טמפרטורת החדר - 25°C .

צמיגות הידרודינמית (Viessman and Hammer, 1998) - $\mu = 8.9 \cdot 10^{-4} \text{ kg/(m}\cdot\text{s)}$

צמיגות קינמטית (Viessman and Hammer, 1998) - $\nu = 8.93 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$

צפיפות סגולית לחלקיק מינרלי (הנחה לפי Viessman and Hammer, 1998) - $\rho_s = 2540 \text{ kg/m}^3$

צפיפות סגולית לחלקיק אורגני (הנחה לפי Viessman and Hammer, 1998) - $\rho_o = 1010 \text{ kg/m}^3$

צפיפות סגולית של המים בטמפ' החדר (Viessman and Hammer, 1998) - $\rho_l = 997 \text{ kg/m}^3$

צפיפות יחסית של חלקיק מנרלי $S_g = 2.54$.

טבלה 10: חישוב מהירויות שיקוע עבור חלקיקים בגדלים שונים, מינרליים ואורגניים

גודל חלקיק ($\cdot 10^{-6} \text{ m}$)	Stokes' law (cm/hr)	תיקון לפי צורה (cm/hr)	קיצור דרך (cm/hr)	
2	1.36	1.13	1.87	חלקיק מינרלי
4	5.44	4.51	6.77	
7	16.65	13.82	19.01	
12	48.93	40.63	51.01	
2	0.011	0.01	0.006	חלקיק אורגני
4	0.046	0.038	0.027	
7	0.140	0.116	0.086	
12	0.412	0.342	0.264	

נתוני הטבלה מראים כי הערכים הגבוהים ביותר של מהירות שיקוע החלקיקים המינרליים התקבלו ב"קיצור הדרך". הסטייה הגדולה ביותר מתוצאות חישוב Stokes היא עבור החלקיק הקטן ביותר (כ- 30% סטייה) והסטייה הקטנה ביותר עבור החלקיק הגדול ביותר (4% סטייה). עבור חלקיקים אורגניים תוצאות קיצור הדרך הן הנמוכות ביותר. מהירות השיקוע המחושבת עבור חלקיקים שאינם כדוריים נמוכה כצפוי ממהירות שיקוע חלקיקים כדוריים.

לשם השוואה בין תוצאות המודלים לתוצאות ניסויי השיקוע, חושב זמן השיקוע של חלקיק בגודל $4 \mu\text{m}$ (גודל ממוצע של הפרקציה העיקרית), ע"פ נוסחת התיקון לפי הצורה (נוסחה 7), עבור עמודה של 165 ס"מ. נמצא כי עבור חלקיק מנרלי ידרשו 36.6 שעות, כלומר 1.5 יום. עבור חלקיק

אורגני בגודל זהה יש צורך ב- 4342 שעות (181 ימים)!! מאחר ורוב החומר המרחף במי הירקון (ברוב התחנות) הוא אורגני ובכל זאת מתקיימת הרחקה של חומר מהמים כבר לאחר כמה ימים הרי שתוצאה זו לא יכולה לתאר את התהליכים בעמודת מי הירקון, דבר שמחזק את התצפיות לקואגולציה, הפתתה וספיחה, באמצעותם מתקיימת "הסעה" של חלקיקים אורגניים מטה.

ב. מספר התנגשויות

מתוך המשוואות שהוצגו נבחרה המשוואה המתאימה לשיקוע דיפרנציאלי (נוסחא מס' 12), על פיה חלקיקים בקטרים שונים ישקעו במהירויות שונות ואגב כך יתנגשו בחלקיקים אחרים, מצב שבהחלט ניתן לראותו כמתאים לשיקוע חלקיקים במי הירקון.

בעקבות ממצאי השוואת העכירות לריכוז החלקיקים הכולל וניתוח התפלגות גודלי החלקיקים שבא בעקבותיו, נראה כי המעניין ביותר יהיה לדעת מה מספר ההתנגשויות בין קולואידים לבין חלקיקים בפרקציה $5-10 \mu\text{m}$, שהתצפיות הראו על עליה בריכוזה (ראו סעיף 5.3.3 א'). אולם, מידע מספרי על ריכוז הקולואידים אין בנמצא מעבר לתיאור האיכותי של מדד העכירות. משום כך הוחלט לבדוק מהו מספר ההתנגשויות בין חלקיקים בגודל $2 \mu\text{m}$ לבין חלקיקים בני $5-10 \mu\text{m}$ (תוך שימוש בגודל ממוצע $7 \mu\text{m}$).

כמו כן חושבו מספר ההתנגשויות של חלקיקים בגודל $2 \mu\text{m}$ עם חלקיקים בגודל $12 \mu\text{m}$ (מייצג פרקצית $10-15 \mu\text{m}$, שגם הראתה גידול מספרי במהלך הניסוי). כדי לקבל מושג מהו המספר שיכול להתקבל עבור קולואידים בני $1 \mu\text{m}$ ו- $0.1 \mu\text{m}$ חושבו ההתנגשויות לפי ריכוזם של החלקיקים בפרקציה $2-3 \mu\text{m}$. התוצאות מובאות בטבלה 11:

טבלה 11: מספר התנגשויות לשניה, בין חלקיקים בפרקציות משמעותיות

גודל חלקיק	$7 \mu\text{m}$	$12 \mu\text{m}$
$2 \mu\text{m}$	153466	206397
$1 \mu\text{m}$	129341	181778
$0.1 \mu\text{m}$	103978	158570

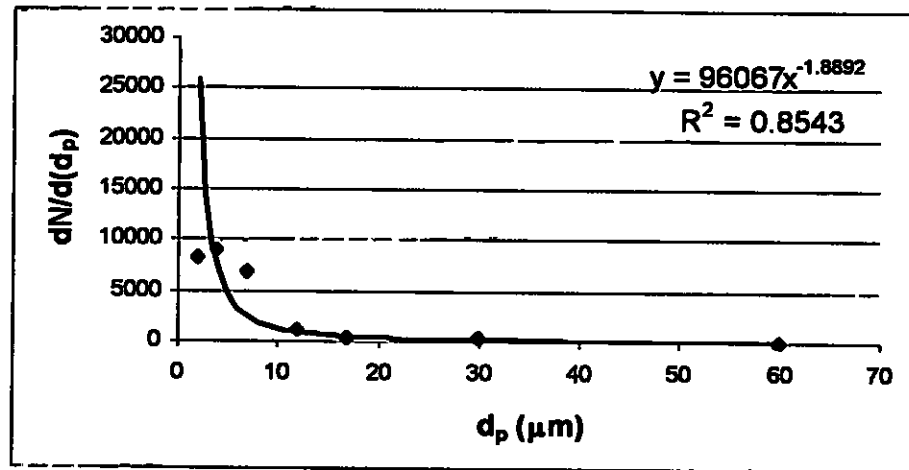
מספר ההתנגשויות אינו מבטא ישירות את מספר ההתנגשויות שמסתיימות בקואגולציה והפתתה (לצורך כך עלינו לדעת מה ערכו של α , שיעור הסתברות ההתנגשויות שמסתיימות בהפתתה, נוסחא 13) אולם נותן הערכה כללית טובה לפוטנציאל ההפתתה.

ג. התפלגות גודל החלקיקים ע"פ ביטוי מעריכי

בחינת התאמת הביטוי המעריכי $dN/d(dp) = A(dp)^B$ (נוסחא מס' 14) לתאור התפלגות גודל חלקיקי מי קולחין, העלתה התאמה טובה למדי ($R^2 = 0.854$) עבור ה- PSD של מי המקור (ציור 38). מחקרים קודמים הראו כי ערכים ראשוניים של מקדם ההתאמה R^2 , עבור מי קולחין ממקורות שונים נמצאו גבוהים ביותר: 0.97, 0.99, 0.98 (Kaminski, 1996, אלון 1989). מי הירקון בתחנה "שבע טחנות" הם מי קולחין לאחר זרימה במערכת טבעית (ערוץ הנחל). היות R^2 שלהם נמוך יותר מבטאת בוודאי את השינויים החלים באופי החלקיקים בעקבות תהליכים טבעיים,

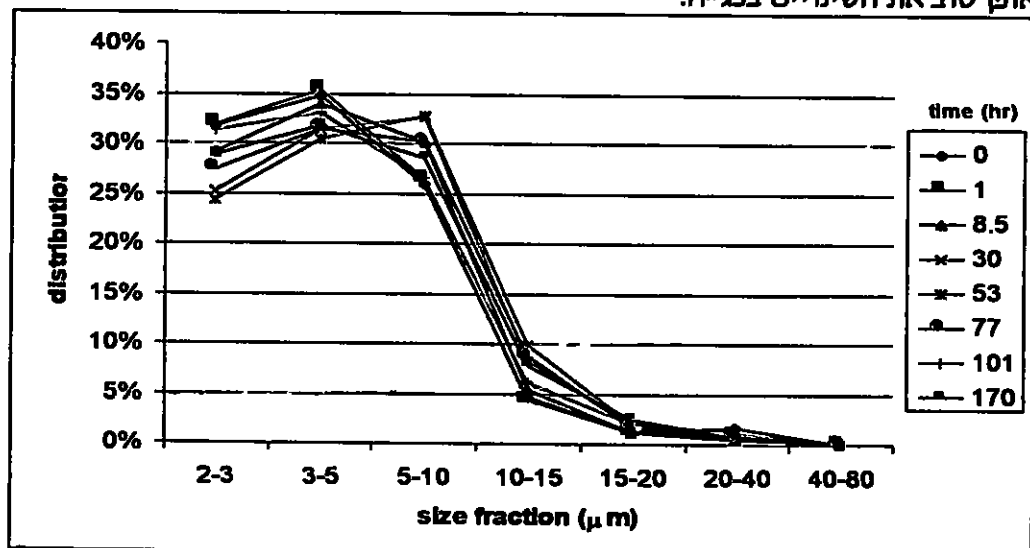
המושפעים מהמערכת הביולוגית, המגע עם גדות הנחל ואף שהות המים באגן השהייה לפני הישפכם מעבר לסכר.

תהליכי טיפול בקולחין מביאים לשינוי בהתפלגות גודלי החלקיקים ולכן בערך ה- β , ובמידת התאמת המשוואה המעריכית (Kaminski, 1996). כך בהמשך השיקוע נתקבלו ערכים של $R^2=0.8349$ $\beta=2.504$ (שי' 8.5); $\beta=2.1849$ $R^2=0.8006$ (שי' 53); $\beta=1.9692$ $R^2=0.8478$ (שי' 101).



ציור 38 : התנהגות ה- PSD לפי משוואה מעריכית, שבע טחנות

אלון (1989) טוען כי ככל שמספר החלקיקים רב יותר בתחום הגודל הקטן - כך גם גדל ערכו האבסולוטי של המעריך (β) ולהפך. מתוך כך, במהלך שיקוע נצפה כי ערכו האבסולוטי של β יגדל עם שיקוע מהיר יחסית של החלקיקים הגדולים והשארותם של החלקיקים הקטנים. סקירת התפלגות גודלי החלקיק בזמנים השונים (ציור 39), מצטרפת לתצפיות שהוזכרו לפני כן, בדבר תהליכי קואגולציה שהביאו לגידול הערך המספרי של חלקיקים בגודל $5-40 \mu m$ במקביל להתמעטות חלקיקים בתחום הגודל $2-5 \mu m$. ערכי β כפי שהובאו לעיל למעשה אינם מבטאים באופן טוב את השינויים בפג"ח.



ציור 39 : שינוי התפלגות גודל החלקיקים לאורך הזמן, שבע טחנות

ד. מאזן מסה

בבואנו לבחון מאזן מסה במקטע נחל יש לכלול גורמים רבים המשפיעים על שינויי המסה ובעצם נדרש לנו מודל שלם לשם יצירת מאזן מסה. בעבודה הנוכחית לא ננסה לעשות זאת משום מורכבות המערכת והצורך בהתעמקות נוספת ביחסי הגומלין בין הגורמים השונים. נספח 3 מציג הדגמה של חישוב מסה סכמטי, המבוסס על נוסחא 17 המובאת להלן.

נוסחא 15 שהוצגה עבור מאזן מסה בגוף זורם (Larsen, 2000), דורשת בחינה של קבילות איבריה במערכת הנחל הטבעית.

(15):

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial x} + v \frac{\partial C}{\partial y} + (w - w_s) \frac{\partial C}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(D_z \frac{\partial C}{\partial z} \right)$$

במערכת נחל זורם, בו תנועת המים בציר X היא העיקרית (u) ובכיוון מסוים, נוכל להזניח את איבריה של המשוואה המתמטיים לתנועה דיפוזיבית שכן הם זניחים ביחס לגודל המהירות העיקרית. כך גם לגבי המהירות בציר Y (v) והמהירות בציר Z (w) משום שתנועת החלקיקים בכיוונים הנוגדים בכל אחד מהצירים Z, Y מאפס את עצמו בעת סכימה על התנועה בציר X. מהירות השיקוע, w, לעומת זאת חשובה ביותר, משום שמשמעה הרחקת החלקיקים מהמים, גורם בעל חשיבות גבוהה כמובן במאזן מסה. כך נותרה המשוואה הבאה:

(17)

$$\frac{\partial C}{\partial t} + U \frac{\partial C}{\partial x} - W_s \frac{\partial C}{\partial z} = 0$$

חישוב מאזן החומר המרחף במי הנחל ע"פ נוסחה 17 עלול להוביל לחוסר שוויון בין אברי המשוואה (ראו נספח 3), סיבות שיכולות להסביר את אי השוויון, הן:

- הרחפת חלקיקים מקרקעית הנחל.
- בליית גדות הנחל, היוצרות סחף נוסף במים.
- פריחת אצות ומיקרואורגניזמים אחרים.

אי השוויון שנוצר מעיד על כך יש לנהוג ביתר זהירות עם השמטת אברים מהמשוואה המקורית: אם למשל יתברר כי הוספת החלקיקים היא בזכות הרחפה, דבר המעיד גם על מערבוליות הרי שלאברי המשוואה המתמטיים לתנועה על ציר Z יש משקל משמעותי; אם יתברר כי בליית גדות מעורבת הרי שתנועה על ציר Y יש חשיבות; שינוי ריכוז החלקיקים בעקבות תהליכים ביולוגיים (למשל תהליך ביוכימי של מעבר פחמן דו חמצני מומס לכדי חומר אורגני של תאי אצות) אינה מבוטאת במאזן המסה, המגדיר כניסות/ יציאות של חלקיקים מ"מלבן" המייצג את מקטע הנחל הנ"ל ובוודאי שיש להוסיף איבר מתאים לצורך כך. בבניית מודל יש לתת גם משקל לתהליכים כימיים של ספיחה ופירוק המשפיעים על מאזן החלקיקים.

5.4 מעקב אחר שיקוע חומר אורגני

בניסויים בהם נערך מעקב אחר החומר האורגני לאורך הזמן נמצא כי:

- בתחילת הניסוי ערכי החומר האורגני, במי שבע טחנות גבוהים מהערכים שנמדדו באבו רבאח בשיעור של פי כ- 1.5 ע"פ נתוני ה-TOC ופי כ- 2.3 ע"פ נתוני בליעת האור, בניסוי הראשון, זאת לעומת הבדל בשיעור של למעלה מפי 3, ע"פ נתוני ה-TOC ונתוני בליעת האור בניסוי השני. נתוני המוצקים הנדיפים מראים על שיעור נמוך יותר של פי כ- 1.25 בניסוי הראשון וכ- 1.8 בניסוי השני. מתוך כך ניתן להניח כי בזמן הניסוי הראשון (25-27/7/2000) ההבדל בין התחנות לא היה כה רב לעומת הניסוי השני (5-8/8/2000). היות שיעור השוני קטן יותר בקרב המוצקים המרחפים הנדיפים מביא למסקנה כי בשבע טחנות שיעור החומר האורגני המומס רב יותר;

- במי התחנה אבו רבאח הייתה הרחקה מהירה יותר של החומר האורגני מאשר במי שבע טחנות. קצב הרחקת ה-TOC היה בסביבות 23-28% ב-20 השעות הראשונות, קצב ירידת בליעת ה-UV היה 7-12%. בשבע טחנות ה-TOC ירד ב-0-11%, ב-20 השעות הראשונות; מי שבע טחנות המסוננים הראו לעיתים שינויים זניחים בריכוזי החומר האורגני (בניסוי שנערך ב-25-27/7) אך לעיתים הראו שינויים יותר משמעותיים וכן תנודות בערכים (ב-5/8);

- הנתונים המצביעים על שיקוע חלקיקים מהיר יותר במי אבו רבאח (40-60% הרחקת חלקיקים לאחר כ-20 ש' באבו רבאח לעומת 26-40% הרחקה בשבע טחנות) יכולים להוות הסבר להרחקה המהירה של החומר האורגני, שפורטה בסעיף הקודם. בהקשר זה יש להזכיר כי החומר המרחף במי אבו רבאח נמצא בעיקרו מינרלי (ע"פ נתוני ה-VSS, TSS). מכאן ניתן להסיק על תהליכי ספיחה של החומר האורגני המסיס/חלקיקי ע"י החלקיקים המנרליים, המשמשים עבור הנספחים כמדיום הובלה, בעל מהירות שיקוע גבוהה יחסית. במי שבע טחנות החומר החלקיקי המרתף הוא אורגני בעיקרו, ובעל מהירות שיקוע נמוכה, כך מתפנה עמודת המים שם מחומר אורגני בקצב איטי יותר. התהליכים במי שבע טחנות המסוננים אינם ברורים לגמרי משום שהתוצאות לא היו עקביות. ובכל זאת ניתן לומר כי מיעוט חלקיקים במים אלו מתבטא בהעדר "מדיום הובלה" והשארות החומר האורגני במים, בעיקר ע"פ תוצאות הניסוי ב-25-27/7.

5.5 השוואה והתייחסות למחקר מקביל : קרקעית הירקון/ פרופ' אבנימלך,

במקביל למחקר הנוכחי, נערך מחקר ע"י צוות חוקרים מהטכניון, בראשותו של פרופ' אבנימלך. המחקר הני"ל התמקד במיפוי הבוצה לאורך הנחל, עוביה, ואפיוניה הכימיים. להלן ייעשה ניסיון ליצור אינטגרציה והשוואה בין שני המחקרים, תוך שימוש בשני הדו"חות שהוצאו ע"י הצוות. חשוב לציין כי אחד הממצאים החשובים של דוחות אלו הוא העובדה כי חורף 2000 הביא עמו שטפונות שגרפו את הבוצה באופן משמעותי למורד הנחל ולשפך הים. פועל יוצא מכך הוא שוני שנתקבל באפיון הנחל בשני הדוחות.

- השוואת נתוני עומק הבוצה עם מהירויות שיקוע:

1. אבו רבאח: עומק בוצה רב- בסביבות מטר ומעלה. נמצאה מהירות שיקוע גבוהה יחסית בחורף (כ- 50% הסרה ב- 10 שעות). בקיץ נמדד קצב שיקוע איטי יותר: 30-40% הרחקת חומר חלקיקי תוך כ- 10 ש'.

2. תע"ש +3000: בוצה רדודה יחסית, לאחר שבוצה במקטע נחל בסמוך לכניסת נחל קנה נמדדה להיות עמוקה מאד. קצב הרחקת חלקיקים נמדד בסוף החורף (ריכוזי אצות לא מבטלים) להיות 20% ב-10 שעות.
3. שבע טחנות: עומק הבוצה באזור הוא ככל הנראה נע בין 0.2-0.4 מטר וניתן להגדירו כעומק בינוני. תוצאות ניסויי השיקוע באביב ובקיץ הראו שיקוע איטי יחסית (10% הרחקה ב-10 ש'). בחורף היה המצב שונה – הרחקה של כ-40% תומר חלקיקי ב-10 ש'.
4. מורד איילון: נמצאה בוצה עמוקה (בהתאם לצפוי במפגש עם מי ים מלוחים). הרחקת החומר החלקיקי בסוף החורף (ריכוזי אצות גבוהים) נמדדה להיות כ-13% ב-10 ש'.

5.6 דיון כולל וסיכום

5.6.1 התנודות החריפות בריכוזי החלקיקים במהלך השיקוע

ניסויי השיקוע בתחנות השונות הראו כולם תופעה של תנודות חריפות בריכוזי החלקיקים, במקום שיקוע תמידי והרחקה רציפה של החלקיקים מגוף המים. בהסבר תופעה זו יש לזכור כי מערכת הנחל ה"מופרע" (ע"י קולחין) מכילה מרכיבים רבים, שהשפעותיהם באות לידי ביטוי באופן חופף ולעיתים סותר. יש להניח כי בזמנים שונים השפעת מרכיבים מסוימים ניכרת יותר מזו של מרכיבים אחרים ולהפך. בפרק הדיון של "ניסויי השיקוע חלק א" (סעיף 5.2) הועלו אפשרויות שונות להסבר תופעה זו. ההסבר מההיבט הביולוגי, התולה את קיום התופעה בפריחות אצות אינו יכול להתקיים משום שהתופעה נצפתה גם במים עניים באצות כמו מי אבו רבאח בחורף ושבע טחנות בחורף. אולם, אין לבטל לחלוטין אפשרות זו שכן, בגוף מים המכיל ריכוזי אצות גבוהים ובו קיימת תנועה של נוטריינטים, הרי שסביר כי יהיו פלוקטואציות בריכוזי האצות במרחב, דבר שיתבטא בפלוקטואציות בריכוזי החלקיקים הנמדדים. ההסבר המתאיחס להשפעת כוח הגרר כתוצאה של שיקוע "גלי" חלקיקים בשכבת מים נמוכה יותר, אפשרי אולם במידה מצומצמת שכן להשפעה משמעותית על תנודות המים ועל חלקיקים בהם, נוכל לצפות רק במקרה של ריכוזים מאד גבוהים של חלקיקים, תנאי שלא התקיים במי הירקון.

מהירויות השיקוע שחושבו (טבלה 10) לחלקיק מינרלי בפרקציות הגודל $5-15\mu\text{m}$ הן $40-14\text{ cm/hr}$.

מהירויות השיקוע של החלקיקים המינרליים למעשה יכולה להסביר שינויים בריכוזי החלקיקים משעת דגימה אחת למשנתה, אולם כעבור שעות ספורות בלבד מורחקים החלקיקים המינרליים מהעמודה בכלל ומרום העמודה בפרט. החומר הנותר במים הוא אורגני בעיקרו ובעל מהירות שיקוע נמוכה ($0.09-0.26\text{ cm/hr}$), כך שלא נצפה לתנועה מהירה שלו לאורך העמודה באופן שיצור הצטברות פתאומית (שאינה צפויה על פי נתוני נקי עומק רדודות יותר בנקי זמן קודמות) בעומק כלשהו.

ניתוח נתוני השיקוע בניסוי שנערך בשבע טחנות במאי 00' (ניסויי שיקוע חלק ב') הביא למסקנה כי תהליכי קואגולציה והפתתה מתרחשים באופן משמעותי בעמודת המים. ככל הנראה יצירת שיאי ריכוזי החלקיקים והעלמם בנקודת זמן עוקבת, אכן קשורים לתופעת ה-secondary minimum, ע"פ תאוריית DLVO (O'Melia et al., 1996). לתופעת ה-secondary minimum מיוחסת

היווצרות צברים לא יציבים שעלולים להתפרק ביתר קלות. כמו כן, במהלך השיקוע, חלקיקים (מינרליים /אורגניים), שספחו תרכובות אורגניות מסיסות המכילות קבוצות פונקציונליות על פניהן ואף פוליסכרידים, נמצאים בכפיפה אחת, וקשרים מסוג גישור וספיחה יכולים להיווצר ביניהם. עצם קיום הקבוצות הפונקציונליות הטעונות חשמלית (שלילית) יתכן והביא לעליית החוזק היוני באופן זמני ונקודתי, דבר שיתכן וסייע בהורדת אנרגיית הסף להתקרבות. בהמשך השיקוע, כאשר כל המערכת בתנועה, אם הגישור אינו חזק דיו תתרחש התפרקות הצבר. הפירוק לא מחייב להתרחש בזהות למרכיבים - ייתכנו שינויים על פיהם ינוצרו תת צברים יותר קטנים, שיתרמו לפרקציות הקטנות יותר ($2-3\mu\text{m}$, $3-5\mu\text{m}$), דבר שימתן את הירידה בריכוז פרקציות אלו (הירידה בריכוז משום השיקוע). תנאי הניסוי לא אפשרו מעקב כה צמוד אחר המתרחש במים (ע"י איסוף נתונים מלאים בכל נקודות הזמן והמרחב) לשם זיהוי תנאי קואגולציה מועדפים, שכן איסוף נתונים שכזה ידרוש דגימות מים בנפח גדול וע"י כך התערבות בגוף המים והפרעה לתהליכים הטבעיים.

5.6.2 תהליכי ההסעה וההפתתה לאורך הנחל

בחינת תוצאות המחקר לאור הסקירה הספרותית מלמדת כי תהליכי ההסעה (ברכיב האנכי) העיקריים המתרחשים בנחל הירקון מונעים ע"י: א. דיפוזיה, ככוח המשפיע על קולואידים; ב. שיקוע דיפרנציאלי המתקיים משום מגוון בגודל החלקיקים מעל 1 מיקרו מטר, (התחום ממנו והלאה מתקיימת תנועה גרוויטציונית) דבר המביא למצב של "Flocculent suspension" כאשר מהירות שיקוע של החלקיקים משתנה עם העומק משום גודלם המשתנה עם ההפתתה. הסעה ברכיב המישורי (יחד עם הזרימה), מתקיימת עבור חלקיקים גדולים מ- 1 מיקרומטר עד תום מהלך שיקועם הגרוויטציוני. מבין הקריטריונים לקואגולציה, שהועלו בסקירה הספרותית, נמצא כי ביטוי גורמים אלו בירקון מתקיים לפי הפירוט הבא:

- העכירות היתה בד"כ בינונית למדי (15 – 35 NTU). משמעות הדבר הסתברות נמוכה ובינונית של התנגשויות בין החלקיקים. היות מי הירקון שוקטים בד"כ מפחיתה גם היא את הסתברות התנגשות החלקיקים.
- יונים בתמיסה: ע"פ אנליזה כימית שנעשתה למי שבע טחנות (נתונים לא מוצגים) נמצא כי סולפאט (המוגדר כאניון בעל השפעה מפריעה לתהליך היפוך המטען) (Amirtharajah and O'Melia, 1990) קיים בריכוז של כ- 0.8mM. לעומתו Ca^{+2} המוגדר כבעל השפעה חיובית על ערעור יציבות החלקיקים, נמצא בריכוז 2.6mM.
- פוטנציאל ζ נמצא בד"כ מקורב ל- 20mV, ומעיד על יציבות גבוהה יחסית של החלקיקים.
- חומר אורגני נמצא בתמיסה ובעל השפעה (פירוט בהמשך).
- נוכחות משמעותית של אצות מבטיחה קיום פוליסכרידים חוץ תאיים המשמשים כביופלוקולנטים. במי הירקון נמצאו בד"כ ריכוזי אצות גבוהים אולם לא תמיד – בזמן סערות חורף נמצאו ריכוזים זניחים לעיתים – גם בתחנות שמאופיינות בד"כ בריכוזי אצות גבוהים (תחנות מורד הנחל, בחורף).

אחד הכלים החשובים שהובילו למסקנה כי במי שבע טחנות התרחשו תהליכי קואגולציה והפתתה במהלך השיקוע, הייתה השוואת העכירות וריכוז החלקיקים (TPC) השארייתיים בניסוי השני בשבע טחנות (ניסויי שיקוע חלק ב', ציור 35), שהביאה לבחינה מדוקדקת של השינויים בריכוזי פרקציות הגודל השונות. בעקבות הממצאים שהוצגו בציור 35, נבחן הדבר גם בנתוני שיקוע מי הנחל מהתחנות תע"ש 3000+ ומורד איילון (נספח 4). נמצא כי התופעה אינה חוזרת על עצמה באותו אופן: במי מורד איילון הירידה בעכירות דמתה להפליא לירידה בריכוזי החלקיקים, למעט בנקודות הזמן 11 ש' ו-24 ש', בהן התרחשה עליה ב-TPC השארייתי (העלייה נגרמה בעיקר עקב עליית ריכוז הפרקציה $10-15\mu m$). בתע"ש 3000+ אין כל התלכדות בין העקומות ומגמות הירידה דומות, כאשר ה-TPC יורד מהר יותר, עובדה הגיונית ביותר משום שיקוע מהיר יותר של החלקיקים הגדולים ביחס לקולואידים המשפיעים חזק יותר על העכירות. משמעות הדבר כי תהליכי ההפתתה אינם מתרחשים בהכרח לאורך כל הנחל ובוודאי שלא באותו היקף. חשוב לציין כי ניסויי השיקוע לא יכלו היו להתקיים כולם באותו זמן בדיוק מסיבות טכניות ברורות. התוצאה היא תנאי טמפרטורה שונים ואף תכולת חלקיקים שונה (למשל השוני בריכוז החלקיקים המינרליים בעקבות סערות). סברה כי תהליכי הפתתה מתרחשים באופן יחסי יותר במי התחנה שבע טחנות יכולה להתמך ע"י נתוני אפיון החלקיקים שנערכו בשנת המחקר הראשונה: נמצא כי הקוטר הממוצע הגבוה ביותר מבין ארבע התחנות הנבדקות הוא בשבע טחנות וכן בתחנה זו נמצאה השונות הגבוהה ביותר בקוטר הממוצע לאורך שנת הדיגום. עובדה זו יכולה לנבוע מפוטנציאל הפתתה המשתנה לאורך הזמן, ובעקבותיו מתקבלים ערכים משתנים של קוטר חלקיקים.

5.6.3 השפעת האצות על החלקיקים בנחל

בפרקים קודמים הוצגו ההשפעות הסותרות שבנוכחות אצות. ניסויי השיקוע שהתבצעו בימים חמים ואופיינו במים עשירים באצות הראו את ההשפעה השלילית שבנוכחות אצות (שיקוע איטי). מאחר והקולחין המוזרמים לנחל עניים יחסית בחומר מרחף מינרלי ומאחר וקצב השיקוע של חלקיקים מינרליים מהיר יחסית, הרי שבמורד הנחל יש מעט חלקיקים מינרליים. שיקוע משותף של אצות וחלקיקים בזכות גישור פוליסכרידים חוץ תאיים מצריך קיום ריכוז מספק של אצות ושל חלקיקים מינרליים. פוטנציאל עידוד השיקוע בזכות האצות, אינו מתקיים אם כן, ולכן התכונה הדומיננטית של האצות במי הירקון היא משקלן הסגולי הנמוך, המביא למהירות שיקוע נמוכה ביותר. נקודה חשובה נוספת המשפיעה על תוצאות ניסויי השיקוע, היא עריכת הניסויים בעמודת פרספקס שקופה דבר שאפשר לאצות לבצע פוטוסינתזה גם בהיותן בעומק העמודה. בתנאים הטבעיים נמצא כי חדירות האור נמוכה בעומק הנחל, דבר שהתבטא בין השאר בריכוזי חמצן נמוכים מאד בתחנות כמו שבע טחנות ותע"ש 3000+.

5.6.4 השפעת החומר האורגני על החלקיקים בנחל

עיקר החומר האורגני במי הירקון (לא בהכרח בקטע הנחל הנקי) הוא מסיס וככל הנראה מקיים קשר דינמי עם המדיום החלקיקי במים. היות החומר המרחף במי הירקון בעיקרו אורגני, משפיע באופן ברור על שיקוע איטי של החלקיקים. למרות שממצאי ניסויי שיקוע החומר האורגני מצביעים על תהליכי ספיחה והסעה שלו, הרי שלא ניתן לאמוד את שיעור ההשפעה של החומר האורגני בפלוקטואציות של ריכוזי החלקיקים שנצפו בניסויים השונים (השפעה המתקיימת דרך

יציבות חלקיקים, באמצעות מנגנוני ספיחה והנתקות). הסיבה המקשה על אומדן זה, היא קיום הפלוקטואציות גם בניסוי במי אבו רבאח, שנערך בחורף וכלל ערכים זניחים ביותר של חומר אורגני חלקיקי (חומר אורגני מסיס יהיה במים באופן טבעי עקב קיום סחף של קרקע המכילה תרכובות הומיות).

5.6.5 ביצוע ניסויי שיקוע

א. ניסויי השיקוע שנערכו הוכיחו את יעילות השימוש במונה החלקיקים ככלי עיקרי על פני מד עכירות, שהיווה כלי עיקרי במעקב אחר החומר המרחף במחקרים קודמים. עליונות מונה החלקיקים התבטאה ב: 1. יכולת לזהות את הפלוקטואציות בריכוזי החלקיקים באופן מדויק למדי (חזרתיות טובה בד"כ בהרצות המכשיר) דבר שלא ניתן היה להבנתה עם רגישותו הנמוכה של מד העכירות; 2. תוצאות התפלגות גודל החלקיקים אפשרה מעקב פרטני אחר תהליכי הקואגולציה וההפתתה שהובחנו במחקר זה. מידע כזה בוודאי שלא ניתן היה להפיק ממד עכירות. חשוב לציין כי השימוש במקביל במד העכירות מספק מידע השוואתי השופך אור בעל משמעות רבה על התהליכים בעמודת המים.

ב. בחלק ניסויי שיקוע החומר האורגני נעשה שימוש במקביל הן בבליעת אור UV באורך גל של 254nm והן במדידות TOC. התוצאות בד"כ היו חופפות אולם לא תמיד הציגו מגמות זהות, דבר המחייב בחינה של שיטות מחקר אלו ובחירת השיטה המדויקת יותר. בליעת אור UV שהינה שיטה המספקת מידע איכותי יותר (בניגוד לכמותיות של ה-TOC) נמצאה ככלי מהיר ויעיל להערכת ריכוזי החומר האורגני בגוף המים, וזאת בהתאם למחקרים קודמים (Edzwald et al., 1985). יש לתת את הדעת לגורמים מפריעים (הנותנים בליעת רקע באורך הגל הזה) כמו ניטריט וברומיד.

5.6.6 השלכות המחקר לגבי אפשרויות הטיפול במים

פוטנציאל הטיהור העצמי של הנחל אינו גבוה משום ששיפוע ערוץ הנחל קטן מאד והזרימה איטית בד"כ, עובדה המונעת עירבוליות שתוביל להמסת חמצן, כפי שנמצא בנחלים בעלי שיפועים חדים (Dor et al., 1976). אולם, מצד שני הזרימה האיטית שממנה נגזר מבנה נחל של "אגני שיקוע" כשתנועת המים היא מאגן לאגן, מאפשרת שיקוע של חלקיקים בעלי מהירות השיקוע האיטית. זרימה שיטפונית בזמנים של סערות מביאה כמובן לערבול משמעותי של עמודת המים והרחפה נכרת של הבוצה מהקרקעית, אולם נמצא (אבנימלך, 2000) כי לתרחישים כאלו השלכות חיוביות לגבי הנחל משום הזרמת הבוצה לשפך היס.

טיפול במי נחל הירקון יכול לשרת שתי מטרות שונות: שיפור איכות המים הזורמים בערוץ הנחל והכשרת המים לשם שימוש חוזר במסגרת המאמצים לסייע למשק המים הישראלי.

פתרון "ירוק" אשר יקדם את תהליכי הטיהור העצמי של הנחל הוא יצירת "אגנים ירוקים" (בדומה למה שהוצע ע"י גרין (1995), לגבי נחל אלכסנדר) בתואי נחל קנה, לפני השפכו לירקון. אגנים ירוקים יביאו לשיפור משמעותי של איכות המים בזכות חמצון חומר אורגני (ע"י הביופילם המתפתח במערכת זו), הסרת חלקיקים מהמים והפתת נוטריינטים המסייעים בפריחת אצות ומיקרואורגניזמים. תגובת המערכת האקולוגית תוביל להופעת מגוון מיני אצות

ומיקרואורגניזמים אחרים שאינם רק מסוג "סבילים לזיהום". בנוסף, הצללת גוף המים תאפשר קיום אצות בעומק עמודת המים, מה שיסייע בחמצון הבוצה הצבורה על הקרקעית, דבר שמצידו ישפר את איכות המים במורד הנחל משום נטרול הרחפת הבוצה. גם לכשתשופר איכות הקולחין המוזרמים בנחל קנה, רצוי כי אגנים ירוקים יימצאו בתוך שלפני כניסתו לירקון, כדי להבטיח אזור "בופר" הנחוץ במקרים של תקלות במתקני הטיפול בשפכים והזרמת שפכים גולמיים.

"סחרור מטופל", הכולל סחרור המים ממורד הנחל, חזרה למעלהו וכן מרבג ביולוגי, יתרום לפתרון הן בעיית ספיקות נמוכות לאורך הנחל והן בעיית החומר האורגני, ע"י חמצונו.

פתרון חליפי לאגנים הירוקים, שהינו יותר טכנולוגי אך פועל על סמך אותם עקרונות ביוגאוכימיים הוא סינון חול איטי. בסינון כזה מתפתחת אוכלוסיית מיקרואורגניזמים בעומק במצע המסייעים בחמצון החומר האורגני. מחקרים שונים (רוזן 1994, אופיר 1997, גלמן 1997) הצביעו על היתרונות שבשימוש בסינון חול איטי להשבת מי קולחין, אולם התריעו על הבעייתיות שביצירת תנאים אנאירוביים בעומק המצע, מצב המפחית באופן משמעותי את יעילות הסינון. משום עומס החומר האורגני בנחל קנה יש פוטנציאל גבוה להתפתחות תנאים אנאירוביים ויש לקחת זאת בחשבון.

אם יוחלט להפחית מהעומס האורגני במי הנחל בדרכים נוספות, הרי שפרקציונציה של החומר האורגני, ותאפשר בחירת הטיפול המתאים ביותר, ע"פ עקרונות שפורטו לפני כן (Dickenson and Amy, 1999).

מומלץ כי ינקטו פעולות מבוקרות של חמצון הבוצה, שכן הבוצה מספקת מאגר של חומר אורגני הנתון להרחפה ולפגיעה באיכות מי הנחל באופן קבוע (למשל בעבוע אויר במקטעים בודדים כל פעם יאפשר הן את חמצונו והן יסייע בהסעתה בגוף המים לשפך היס).

מומלץ לאתר נקודות עיקריות של כניסת שטפונות חורף המביאים עימם זיהומים שונים, לאפיין את אוכלוסיית החלקיקים (מבחינת גודל בעיקר) ולבצע סינון מתאים של מי השטפונות לפני היכנסם לנחל. כך יתווסף לנחל מקור מים שיביא לשיפור איכויותיו (ניתן להרחיב אפשרות זו ולנקז באופן מכוון נגר עילי עירוני מטופל, לנחל- תוך התחשבות בקיבולתו).

שימוש חוזר במי נחל הירקון המטופלים, לפני השפכם לים, יכול להיות בשימוש עירוני כמו השקיית פארקים עירוניים וגנים, הדחת אסלות ואף שימושי פנאי ונופש. אלו האחרונים דורשים רמה גבוהה יחסית של מי הנחל ואף צינורות השקיה נוטים להיסתם בעת שימוש בקולחין משום התפתחות "ביופילם" על דפנות הצינור. אם יבנו האגנים הירוקים בכניסת נחל קנה יש לשער כי עומס החומר האורגני יפחת, אך עדיין אוכלוסיית החלקיקים תהיה מושתתת על חומר אורגני. המחקר הראה כי לא ניתן לסמוך על שיקוע טבעי ראשוני, כך שיש לשקול טיפול מתקדם יותר. נמצא גם, כי קיים פוטנציאל הפתחה של החלקיקים במים ועל כן יש למצוא את סכמת הטיפול שתנצל זאת באופן הטוב ביותר (במגבלות הכלכליות). למשל, סכמה המכילה סינון גס, ספיחת

חומר אורגני ע"י פחם פעיל וסינון חול מהיר או סכמה המושתתת על הפתתה וסינון ממברנלי. שילוב סינון חול איטי יכול להיות פתרון גם הוא.

לשם הספקת מי הנחל לטיפול מתקדם, רצוי לשאוב אותם לפני הערבוב עם מי היס, משום שהערבוב יעלה את מליחותם ויפסול שימוש בהם להשקיה, אלא אם כן יעשה שימוש בטכניקת התפלה יקרה.

אתר מתאים למאגר המים ולטיפול בהם הוא התחנה שבע טחנות. במאגר המים שלפני סכר שבע טחנות יש בהחלט לוודא קיום בוצה זלילה ומחומצנת, אחרת יהיה קשה לשלוט באיכות מים קבועה.

5.6.7 תאור איכותי של מערכת נחל הירקון

מקורות הירקון נובעים מים שפירים שנשאבים ברובם לשימוש מי שתייה, ומיעוטם זורם בערוץ. המים בחלק הנקי של הנחל מכילים ריכוזי חלקיקים גבוהים. החלקיקים ממקור סחף ובהתאם מאופיינים בכדוריות טובה למדי (דבר המאפיין חלקיקים שעברו בלייה תוך כדי הסחפותם בזרם) וכן הם בעיקר מינרליים. שני נתונים אלו מביאים למהירות שיקוע גבוהה ואכן נמצאה בוצה עמוקה בחלק הנקי של הנחל. בהמשך נכנס נחל קנה המורכב מקולחין ברמה בינונית ומשפכים ביתיים ברמה נמוכה. התוצאה היא עומס אורגני כבד על הנחל וכן עומס חלקיקי כבד. ביטוי לכך מנקי זו ואילך בתנאים כמו: ריכוזי חמצן מומס נמוכים בעיקר עם העומק, חזירות אור נמוכה, וקיום אוכלוסיות אצות מסוג ה"סבילות לזיהום". מעט לאחר כניסת נחל קנה מתרחש שיקוע של חלק גדול מהחומר המוסע, דבר הבא לידי ביטוי בבוצה עמוקה (עשרות ס"מ) ובריכוז חלקיקים נמוך יחסית כבר כמאה מטר לאחר כניסת נחל קנה. החלקיקים במורד כניסת נחל קנה מאופיינים במגוון צורות בין השאר צינוריות ואלטיפסואידליות, דבר המעיד על השפעתו התזקה של נחל קנה מאחר ומי קולחין מאופיינים במורפולוגייה זו. בהמשך הזרימה מהירה מעט יותר ומאפשרת שיקוע מועט, דבר המתבטא בבוצה רדודה. סיבה אפשרית נוספת לשיקוע מועט היא עומס החומר האורגני המומס והחלקיקי המביא לייצוב החומר המרוחף, דבר שמתבטא גם בקוטר חלקיק קטן. ובכל זאת נראה כי לאורך מקטע זה מתקיימים תהליכי ספיחה בין החומר האורגני לבין חלקיקים מינרליים שבחלקם ככל הנראה הורחפו וחזרו לגוף המים (הדבר מתרחש בוודאי עוד יותר בסכר תע"ש המהווה הפסקה בזרימה ומאפשר זמן שהות לשיקוע מסוים). התוצאה היא פינוי מסוים של החומר האורגני כך שבאזור שבע טחנות העומס האורגני נמוך יותר ותהליכי קואגולציה והפתתה מתרחשים. מאחר ושיעור התרחשות ההפתתה משתנה, מתקבלת באזור אוכלוסיית חלקיקים מגוונת גודל וצורה. אופי הזרימה איטי וקיים זמן שהייה לפני זרימה מעבר לסכר שבע טחנות. היות החומר אורגני בעיקרו, מתבטא במהירות שיקוע נמוכה ביותר. בהמשך מתקיים מפגש בין שלושה גופי מים: מי הירקון, מי נחל איילון (בזמנים שקיימת בו זרימה) ומי היס החודרים לכיוון היבשה בערוץ הנחל. התוצאה היא אומנם עלייה משמעותית בחוזק היוני (מתבטא בעלייה משמעותית בהולכה החשמלית) ונמדדה במקום בוצה עמוקה, אולם בחורף משום מיהול המים, החוזק היוני אינו רב כ"כ ובהתאם תהליכי הקואגולציה מצומצמים ונמצאה מהירות שיקוע נמוכה. ריכוזי חלקיקים גבוהים ביותר נמדדו בתחנה זו (בדומה לאבו רבאח) וגם הם מאופיינים בכדוריות טובה למדי. לא ברור מקורם אך יש לשער שחלקם הובלו ע"י נחל

איילון, חלקם ממקור מי הים וחלקם הורחפו מהקרקעית אולי משום מערבוליות שנוצרה בעת מפגש הנחלים.

6. מסקנות

1. באופן כללי ניתן לומר, ששינויים בצפיפות החלקיקים לאורך הנחל היו דומים לאורך הזמן. בממוצע, מתוך כ- 100,000 חלקיקים למ"ל באבו רבאח, ירדה הצפיפות לכ- 45,000 חלקיקים למ"ל בתע"ש +3000, נשארה כמעט ללא שינוי בשבע טחנות (כ- 40,000) ועלתה ל- 110,000 חלקיקים למ"ל במורד אילון. באבו רבאח ומורד איילון נצפו שינויים של כ- 60-80% לאורך הזמן בעוד שבתחנות תע"ש +3000 ושבע טחנות השינויים היו קטנים יותר, כ- 30%. מידת הדמיון בהתנהגות ריכוזי המוצקים המרחפים נמוכה לאורך הנחל ולאורך הזמן. בד"כ נעו הערכים בתחום 15-30 מג"ל. שיעור המוצקים המרחפים הנדיפים עלה לאורך הנחל, ברוב חודשי התצפית.
2. הפרקציות הדומיננטיות בקרב גודלי החלקיק הן $5-10\mu\text{m}$, $3-5$, $2-3$. מאז מרץ '98 הפרקציה הדומיננטית בד"כ היא $5-10\mu\text{m}$. למרות שינויים גדולים בצפיפות החלקיקים לאורך הזמן, לא נצפו שינויים גדולים בהתפלגות החלקיקים לפי גודלם באבו רבאח ובמורד איילון: במשך תקופת הדיגום 85-90% מהחלקיקים היו קטנים מ- $10\mu\text{m}$. הקוטר הממוצע באבו רבאח היה $5\mu\text{m}$ ובמורד אילון $7.7\mu\text{m}$. בממוצע. בתע"ש +3000 ובשבע טחנות התפלגות גודל החלקיקים גדולה יותר: חלקיקים קטנים מ- $10\mu\text{m}$ היוו 60-85%. בתע"ש +3000 הקוטר הממוצע היה $5\mu\text{m}$, ובשבע טחנות הקוטר נע בטווח $6.3-20.4\mu\text{m}$. ההתפלגות הנפחית נגזרת מהתפלגות גודל החלקיקים. נמצא כי השינויים היו רבים לאורך הנחל ולאורך הזמן. מהתוצאות עולה שיש להתייחס להתפלגות הנפחית בכל דיגום בנפרד.
3. שיקוע החלקיקים במי נחל הירקון אינו מאופיין במגמה קבועה של הסרת חומר אלא בתנודות חריפות בריכוזי החלקיקים בעיקר ביומו הראשון של ניסוי השיקוע. נראה כי הסיבות לכך נעוצות בתהליכי הפתחה ופירוק דינמיים, בהם נוטלים חלק קולואידים, חלקיקים מפרקציות גודל גדולות יחסית ($5-40\mu\text{m}$), חומר אורגני חלקיקי ומומס ואף ביפולימרים שמקורם במיקרואורגניזמים בנחל (לרבות האצות). קצב השיקוע בתחנות בהן נמצאו ריכוזי אצות גבוהים היה נמוך מ- 20% הסרת חלקיקים ב- 10 שעות. העדר אצות בפרט וחומר אורגני בכלל התבטא בקצב שיקוע מהיר בהרבה: בשבע טחנות נמדד בחורף קצב הסרת החומר של כמעט 50% עבור אותו פרק זמן. בנוסף, למאזן המסה בנחל ככל הנראה מתווספים חלקיקים במהלך הזרימה משום הרחפת בוצה וכן מכניסת תשטיפי נגר עילי לאורך הנחל.
4. חומר אורגני משפיע רבות על מערכת הנחל הן משום ששיקור החלקיקים הזורמים לאורך הנחל הם אורגניים והן משום שתרכובות אורגניות מסיסות מקיימות תהליכי ספיחה על גבי החלקיקים ובכך משפיעות על יציבותם ועל נגישותם להפתחה עם חלקיקים אחרים.
5. אצות בנחל הירקון אופיינו כ"סבילות לזיהום". מגוון המינים מושפע מהשינוי העונתי כך שבחורף נספרו מעט מאד מיני אצות ביחס לקיץ (למשל באבו רבאח נספרו בחורף 3 מינים לעומת 12 בקיץ). מגוון המינים מושפע גם מהתנאים בנחל – בשבע טחנות בחודש מרץ נמצאה רק האצה *Chlorella* ובריכוז של 10^6 למ"ל. נראה כי פוטנציאל עידוד הקואגולציה (באמצעות

ספיחה וגישור של ביופולימרים) ע"י אצות, אינו בא לידי ביטוי במי הנחל, משום העדר ריכוז מספק של חלקיקים מינרליים לשם יצירת צברים ברי שיקוע.

רשימת ספרות

Adin A., and Asano T., 1998. The Role of physical-chemical treatment in wastewater reclamation and reuse. *Wat. Sci. Tech.* 37 No.10 p.79-90.

Alon G., and Adin A., 1994. Mathematical modeling of particle size distribution in secondary effluent filtration. *Water Environment research.*, 66, No.6, p.836-841.

Amirtharajah P.E., and O'Melia C.C., 1990. Coagulation Processes: Destabilization, Mixing, and Flocculation, In: *Water quality and treatment*, AWWA, McGraw Hill pub., p.269-361.

Avnimelech Y., Troeger B. W., Reed L. W., 1982. Mutual flocculation of algae and clay: evidence and implications. *Science* 216, p.63-65.

Avnimelech Y., and Menzel G., R., 1984. Coflocculation of algae and clay to clarify turbid impoundments. *Journal of Soil and Water Conservation* 39.

Bhargava D.S., and Rajagopal K., 1992. An Integrated expression for settling velocity of particles in water. *Wat. Res.* 26, No.7, p.1005-1008.

Busch P.L., and Stumm W., 1968. Chemical Interactions in the aggregation of bacteria bioflocculation in waste treatment. *Envi. Sci. tech.* 2, p. 49-53.

Carmichael G.R., 1993. The Effect of shape on particle solids flow. *Particle characterization in Technology*. Vol. 2, p. 206-221.

Dickenson E., and Amy G., 1999. NOM Characterization of four clarified waters subjected to advanced bench-scale treatment processes. 217th ACS National meeting, American Chemical Society, Anaheim, Calif., March 21-25.

Dor I., Schechter H., Shuval H.I., 1976. Biological and chemical succession in Nahal-Soreq: a free-flowing wastewater stream. *Journal of Applied Ecology* 13, p.475-489.

Edzwald J.K., Becker W.C., Wattier K.L., 1985. Surrogate parameters for monitoring organic matter and THM precursors. *Research and Technology*, p. 122-131

Farnsworth-Lee L.A., and Baker L.A., 2000. Conceptual model of aquatic plant decay and ammonia toxicity for shallow lakes. *Journal of Environmental Engineering*, vol. 126, No.3, p.199-207.

Font R., Marcilla A., Colom M.C., 1994. Aggregates of particles in dilute suspensions: estimation of aggregate volume index and diameter. *Powder Technology* 81,p.169-175. Elsevier Science.

Holdich R. G., and Butt G., 1997. Solid/ liquid separation by sedimentation. *Proc. Inst. Mech. Engrs.* 211, part E, p.43-52.

Kaminski I., Vascan N., Adin A., 1996. Particle size distribution and wastewater filter performance. 4th international conference: the role of particle characteristics in separation processes. IAWQ-IWSA.

Knighton D., 1998. *Fluvial Forms and Processes*. Arnold Publishers. p.120-127.

Larsen T., 2000. Measuring the variations of the apparent settling velocity for fine particles. *Water Research, IWA*, vol.34, no. 4, p.1417-1418.

Narkis N., and Rebhun M., 1996. Flocculation in presence of organic macromolecules of natural water and secondary effluents.preprints of the 4th international conference: the role of particle characteristics in separation processes. IAWQ-IWSA. p.68-75.

O'Melia C.R., Hahn M.W., Chen CT., 1996. Some effects of particle size in separation processes involving colloids. Preprints of the 4th international conference: the role of particle characteristics in separation processes. IAWQ-IWSA.

Peavy H.S., 1985. *Environmental Engineering*, McGraw – Hill pub., p. 677.

Santoro T., and Stotzky G., 1968. Influence of cations on flocculation of clay minerals by microbial metabolites as determined by the electrical sensing zone particle analyzer. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 31, p.761.

Semmens M.J., and Ayers K., 1985. Removal by coagulation of trace organics from Mississippi river water. *Research and Technology*, journal of AWWA, vol. 77, p. 79-84.

Teot A. S., and Daniels S.L., 1969. Flocculation of negatively charged colloids by inorganic cations and anionic polyelectrolytes. Symposium on Colloid and surface chemistry in air and water pollution, Environmental Science and Technology, vol. 3, No. 9, p. 825-829. ...

Van Gelder A. M., Chowdhury Z.K., Lawler D. F., 1999. Conscientious Particle counting. AWWA journal, Vol. 91, 12. p. 64-76.

Viessman W., and Hammer M., 1993. Water Supply and Pollution Control. Harper Collins College Publishers, p.274-279.

Viessman W., and Hammer M., 1998. Water supply and pollution control. Harper collins College Publishers.

Weber W.J. Jr., 1972. Physico-chemical processes for water quality control. Wiley pub., New York.

אבנימלך י., הרצברג מ., מליק כ., 1998. דיגוס קרקעית הירקון, מאי 1998. המעבדה למימשק מערכות סביבה, הפקולטה להנדסה חקלאית, הטכניון.

אבנימלך י., מלכה כ., דסה ע., סגל י., 2000. בדיקת קרקעית נחל הירקון, אביב 2000. המעבדה למימשק מערכות סביבה, הפקולטה להנדסה חקלאית, הטכניון.

אופיר י., 1997. סינון חול איטי כטיפול מתקדם בשפכים. עבודת גמר למוסמך במדעי הטבע במסגרת המחלקה למדעי הסביבה, האוניברסיטה העברית, ירושלים.

אלון ג., 1989. אפיון תהליך סינון של קולחים שניוניים באמצעות מודלים תאורטיים והתפלגויות גדלי חלקיקים מרחפים. עבודת דוקטורט, האוניברסיטה העברית, ירושלים.

גלמן, 1997. סינון גרנולרי איטי כטיפול מתקדם בקולחים שניוניים. עבודת גמר למוסמך במדעי הטבע במסגרת המחלקה למדעי הסביבה, האוניברסיטה העברית, ירושלים.

גרין מ., 1995. שיקום נחלים באמצעות אגנים ירוקים. אקולוגיה וסביבה .

כהן נח א., 1982. שקיעת אצות במים היפרסאליניים. עבודת גמר למוסמך במדעי הטבע במסגרת המחלקה למדעי סביבת האדם, האוניברסיטה העברית, ירושלים.

לדרמן א., 1984. הרחקת חומר מרחף ממי מורד הירדן ע"י שיקוע טבעי, שיקוע כימי והפתתה. עבודת גמר למוסמך במדעי הטבע במסגרת המחלקה למדעי סביבת האדם, האוניברסיטה העברית, ירושלים.

רוזן ד., 1994. סינון חול איטי של קולחים. עבודת גמר למוסמך במדעי הטבע במסגרת המחלקה למדעי סביבת האדם, האוניברסיטה העברית, ירושלים.

נספח 1. תוצאות המשך הדיגום

דיגום אוגוסט '99

Depth	DO	light	Temp.	pH	EC	Turbidity	TSS	VSS
(cm)	(mg/l)		(c)		(mS/cm)	NTU	(mg/l)	(mg/l)
אבו רבאח								
0	5.4	450	29.7					
5	5.3	400	29.5					
10	5.2	280	29.3					
20	5.1	180	29.3					
30	5.1	140	29.3					
40	5.1	100	29.3	9.05	0.86	25.7	27.75	8.7
50	5.1		29.1					
60	4.9		29.1					
תע"ש 3000								
0	2.6	1050	31.3					
5	2.2	750	31.1					
10	2.1	610	31					
20	1.6	400	30.5					
30	1.5	270	30.5					
40	1.4	160	30.5	8.85	1.56	12.82	11.75	8.75
50	1.4	100	30.5					
60	1.4	60	30.5					
70	1.4	40	30.5					
80	1.4		30.5					
שבע סחנות								
0	5.1	850	31.8					
5		550	31.8					
10	5	400	31.8					
20	4.6	350	31.4					
30	4	300	31.4					
40	3	160	31.4	8.8	1.45	8.8	8.25	7.5
50	2.6	140	31.1					
60	2	120	31.1					
70	1.6	90	31.1					
80	1.5	85	31.1					
90	1.4		31.1					
100	1.3		31.1					
150	1.1		30.9					
מורד איילון	עקב פעולות שנעשו בגדות הנחל , שכללו הטיית מי האיילון, לא ניתן היה לבצע דיגום המים (קיום סחף משמעותי)							

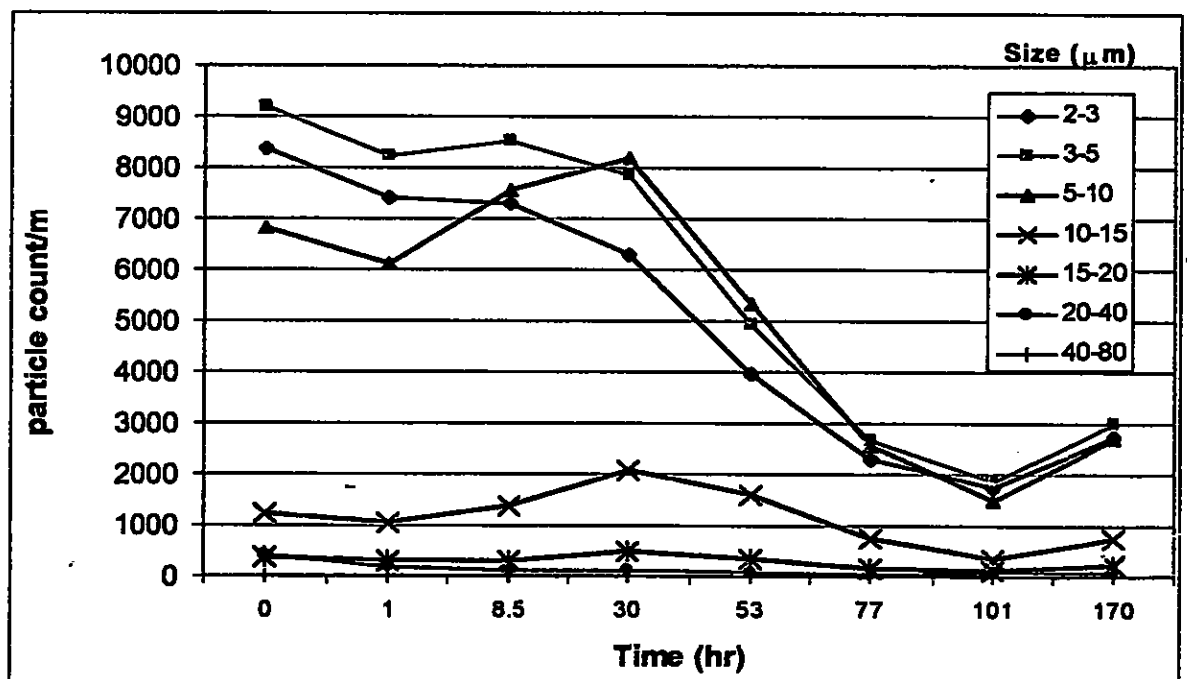
דיגום נובמבר '99

Depth (cm)	DO (mg/l)	light	Temp. (c)	pH	EC (mS/cm)	Turbidity NTU	TSS (mg/l)	VSS (mg/l)
אבו רבאח								
0	18.1	9.3	650					
5	18	9.2	580					
10	17.2	9	500					
15	17	7.6	450					
20	17	7.3	350					
30	17	7.1	235					
40	16.9	6.7	210	18.6	0.91	7.25	19.5	6.5
50	16.9	6.6	150					
60	16.9	6.7	80					
תנ"ש 3000								
0	22.2	4.3	750					
5	22	4.2	600					
10	21.7	4.1	450					
15	21.5	3.9	350					
20	21.3	3.1	240					
30	21	3	170					
40	20.5	3.1	110	9.87	1.4	7.4	15	12.4
50	20	2.9	65					
60	19.7	2.8	40					
70	19.6	2.3	25					
שבע טחנות								
0	19.6	1.9	160					
5	19.6	1.9	115					
10	19.6	1.9	95					
15	19.6	1.9	65					
20	19.6	1.6	55					
30	19.7	1.4	37					
40	19.7	1.4	25	14.5	1.2	7.3	10	5.9
50	19.7	1.4	17					
60	19.7	1.8	11					
70	19.7	2.3						
80	19.7	2.3						
מורד איילון								
0	25.3	7.3						
5	25.3	7.1						
10	25.5	6.8						
15	25.5	6.8						
20	25.2	6.7						
30	25	5.3						
40	25	5		16.9	27	6.75	17	9.75
50	25.2	4.5						
60	25.5	4						
70	26.5	2.6						
80	27.3	1.9						
90	27.5	1.7						
100	27.3	1.7						

נספח 2. שינוי התפלגות החלקיקים לאורך זמן השיקוע,
תחנת שבע טחנות, מאי 2000

שינוי התפלגות החלקיקים לאורך זמן השיקוע, תחנת שבע טחנות, מאי 2000

זמן (שעות)	פרקציית גודל (μm)							סכום
	2-3	3-5	5-10	10-15	15-20	20-40	40-80	
0	8365	9169	6829	1220	361	406	12	26361
1	7403	8213	6127	1022	281	190	5	23241
8.5	7302	8522	7555	1358	289	93	1	25111
30	6306	7853	8177	2058	497	128	4	25023
53	3962	4928	5326	1602	320	85	2	16224
77	2308	2655	2540	736	147	46	1	8433
101	1747	1849	1482	339	111	63	2	5921
170	2729	3001	2696	736	231	67	1	6361



נספח 3. תרגיל במאזן מסה

תרגיל במאזן מסה על החומר המרחף במי הנחל

להלן מובא חישוב מאזן מסה על החומר המרחף בנחל, בהתאם לנוסחה מסי 15. החישוב נעשה לשם הדגמת אפשרויות השימוש במודל, על סמך נתונים שנאספו במחקר זה ובמחקרים מקבילים.

פרמטרים בהם ניתן לעשות שימוש בעת יצירת מאזן מסה (לשם הפשטות החישוב נעשה קירוב מספרי) (הצבת מספרים שהם הפרש ערכים d ולא נגזרת ∂):

1. מקטע נחל שנמצא בעל עניין לשם יישום מאזן מסה הוא המקטע שבין תעייש 3000+ לשבע טחנות.

2. הזמן שנבחר לחישוב מאזן המסה הוא הדיגום הרציף שנעשה בנחל בנובמבר 99, על פיו השינוי בריכוז החלקיקים $(\partial C / \partial t)$ בין שתי התחנות הוא 16270 חלקיקים למ"ל (בחישוב ייעשה שימוש ב- P לייצוג יחידות הריכוז);

3. התייחסות לנחל הירקון כאל נחל זורם לכל דבר, עלולה להיות שגויה בגלל מבנהו. בפועל הזרימה היא איטית בין סכר לסכר, כאשר בטווח הזמן, המים אגורים לפני הסכר. כך שגורם הזמן צריך להיות זמן השהות של המים במקטע נחל. אורך המקטע (∂X) 12 ק"מ ועייפ נתוני רשות הירקון, זמן השהות בו חושב להיות : 58.8 שעות, כלומר 2.45 יום. מהירות זרימה (U) בציר X היא 4.9 שעות לק"מ. לצורך החישוב נתייחס ל- 60 שעות עבור זמן השהות;

4. הביטוי $\partial C / \partial x$ משמעו השינוי בריכוז בציר X ביחס לתנועת חלקיקים על הציר. תנועה בכיוון החופכי לכיוון הזרימה חסרת משמעות ולכן עבור הביטוי יוצב הערך 25900 חלקיקים למ"ל, שהוא הערך שנמדד בתעייש 3000+ בזמן המדובר.

5. מכפלת מהירות השיקוע (w_s) בשינוי בריכוז החלקיקים בעומק $(\partial / \partial z)$ חלקיקים למ"ל) נותנת את הביטוי: $(\partial / \partial z) (w_s \partial C / \partial z)$ (חלקיקים למ"ל). עייפ ניסוי השיקוע במי התחנה תעייש 3000+ שנערך בינואר 2000 השינוי בריכוז החלקיקים בטווח זמן של כ- 60 שעות (ערך מקורב לזמן הזרימה שצוין לפני כן) הוא 77% (התייחסות לשימוש בערך זה תובא בהמשך), ולכן הערך המייצג את הרחקת החלקיקים מהמערכת משום שיקועם הוא 19940 חלקיקים למ"ל (ה- 100% הוא הערך שנמדד בתעייש 3000+ בנובמבר 99).

(15)

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial x} + v \frac{\partial C}{\partial y} + (w - w_s) \frac{\partial C}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(D_z \frac{\partial C}{\partial z} \right)$$

בדיון הוצגו השיקולים לצמצום המשוואה, המבוססים על העובדה כי תנועת החלקיקים היא עיקרית בציר X , עם כיוון הזרימה. הוצגה נוסחה 17:

(17)

$$\frac{\partial C}{\partial t} + U \frac{\partial C}{\partial x} - W_s \frac{\partial C}{\partial z} = 0$$

$$\frac{1km}{4.9hr} * \frac{25900p}{12km} - \frac{19940p}{60hr} = -\frac{\partial C}{\partial t} =$$

$$= \frac{25900p - 19940p}{60hr} = -\frac{16270p}{60hr}$$

$$\frac{5960p}{60hr} \neq -\frac{16270}{60hr}$$

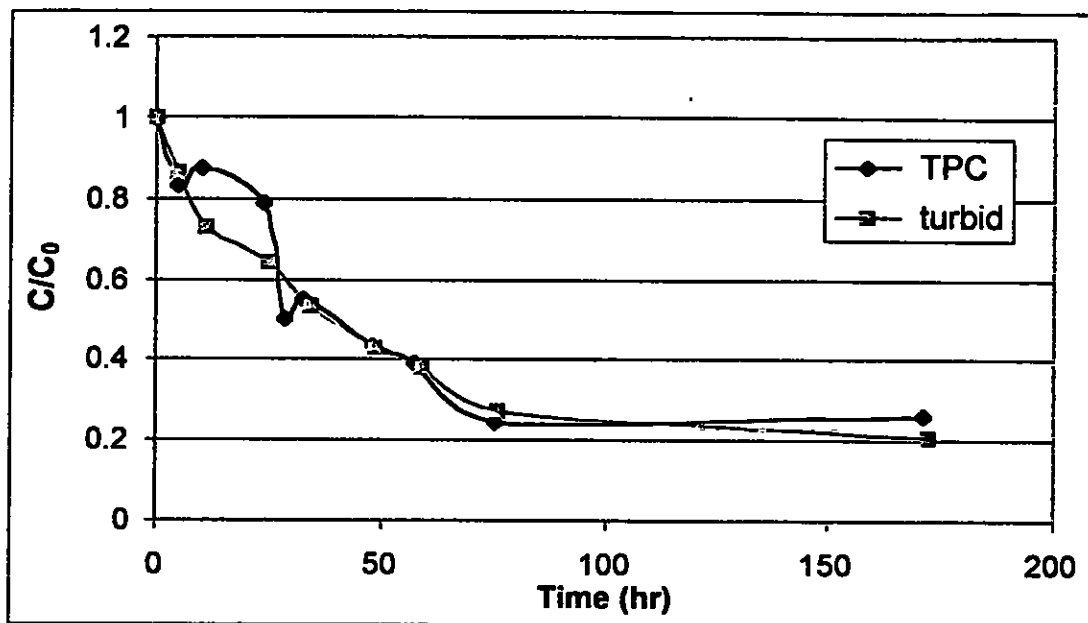
הצבת הערכים במשוואה המקוצרת (17) יוצרת אי שוויון בין איבריה. מתוך מאזן המסה יוצא כי במהלך 60 שעות זרימת הנחל מהתחנה תעייש +3000 לתחנה שבע טחנות נוספים למערכת כ- 10000 חלקיקים למייל (מעבר למה ששוקע). בדיון הוצגו מקורות אפשריים לחלקיקים אלו (בליות גדות, הרחפה, פעילות ביולוגית ועוד). משמעות מקורות אלו היא תנועת חלקיקים בצירים Y ו-Z, שהוזנחו בנוסחה 17, דבר המעלה ספיקות, כמובן, לגבי הזנחה זו.

יש לציין כי משום שימוש בקצב הרחקת חלקיקים על פי ניסוי שנערך בינואר 2000, בו ריכוז החלקיקים בנחל היה גבוה כמעט פי ארבע מהריכוז בנובמבר, הרי שערך של 80% הרחקת חלקיקים בוודאי גבוה מהערך שהיה מתקבל עבור שיקוע בתנאי ריכוז חלקיקים נמוך (עייפ עקרונות שצוינו לפני כן). במקרה כזה הפער היה מצטמצם במידה כלשהי.

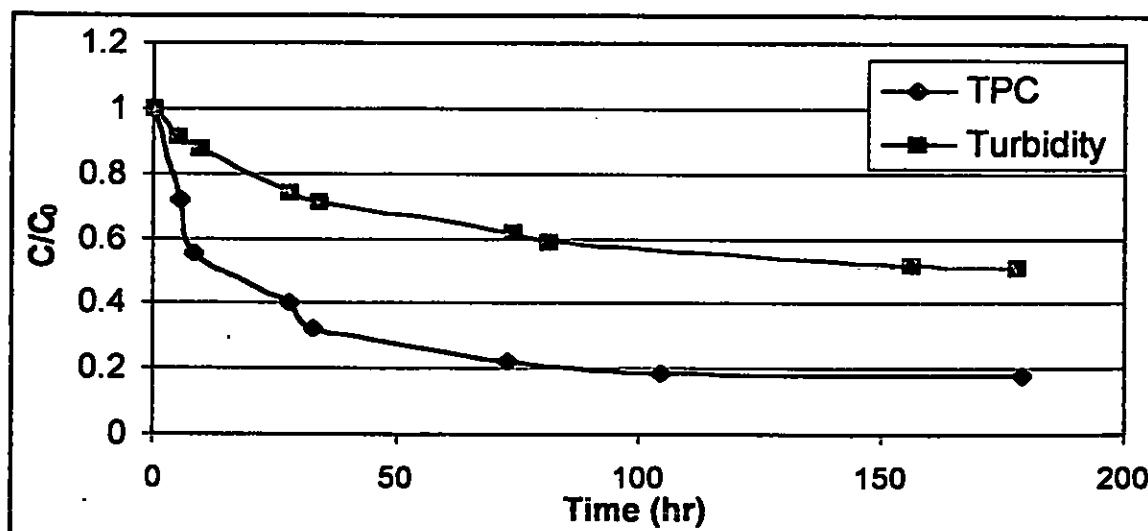
נספח 4. השוואת עכירות ל- TPC בניסוי שיקוע

השוואת ריכוז חלקיקים שאריית ובעירות שארייתית לאורך ניסוי שיקוע

מורד איילון



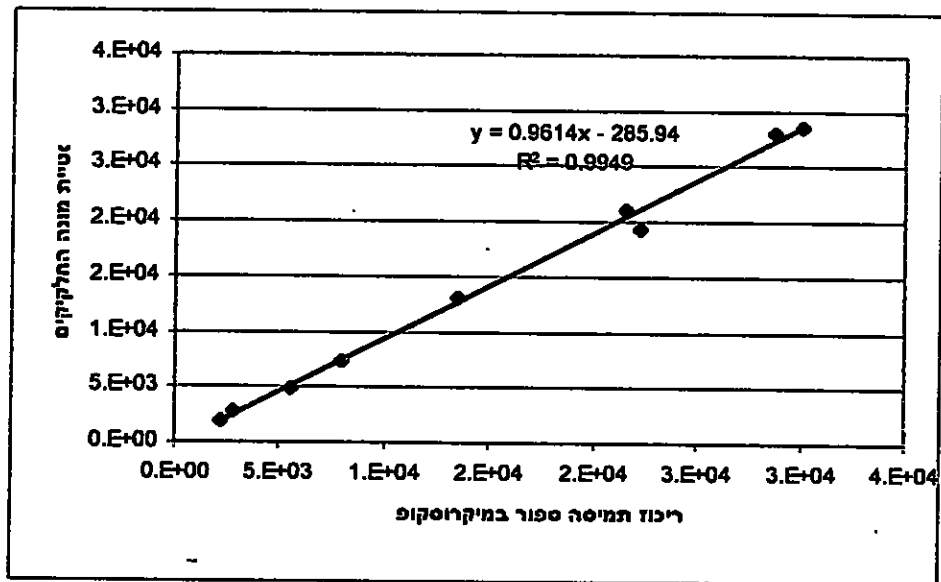
תע"ש 3000+



נספח 5. אופטיקת אצות

אופטיקת אצות

א. ניסיונות השוואתיים לקריאת מונה החלקיקים את תרבויות האצה *Chlorella* שאינה צבועה, הראו כי שיעור סטיית תוצאת המכשיר מהספירה המיקרוסקופית גבוהים מאד ובעצם אחוז הקריאה לעיתים כמעט זניח (ציור 72). בהשוואת ריכוזי האצות הספורים לאלו שנמנו ע"י מונה החלקיקים, נמצא כי בנסוי הראשון (22.12.99) ממוצע קריאת מונה החלקיקים היה 14.3% מספירת המיקרוסקופ, עם סטיית תקן של 0.02. בניסויים הבאים (27.12.99, 14.1.00) ממוצע הספירה היה 3.2% וסטיית התקן 0.008. תנאים שונים של הניסוי יכלו להשפיע על קבלת תוצאות שונות, כגון העדר נקיון מספק בניסוי הראשון. כמו כן אוכלוסיית האצות עלולה להשתנות, למשל הזדקנות תמיסת האם יכולה להתבטא בקיום תאים מתים (או בעקה כלשהי) הניתנים לספירה מיקרוסקופית אך ככל הנראה מאבדים את התכונות האופטיות שלהם ביחס למונה החלקיקים.



ציור 72 : מידת השינוי בין ספירת האצות ע"י מונה החלקיקים ביחס לספירה במיקרוסקופ.

ב. ניסיונות ראשוניים להרצה במונה החלקיקים של אצות *Chlorlla* צבועות ביוד (תוצאות לא מוצגות) העידו על הפוטנציאל הקיים בצביעה. בחינת פרוצדורת הצביעה באמצעות האצה *Synedra* הראו כי שילוב של תמיסת Lugol + Methyl blue הניבו את התוצאות הטובות ביותר.