

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 3-5 μm 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, אפיוניו 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

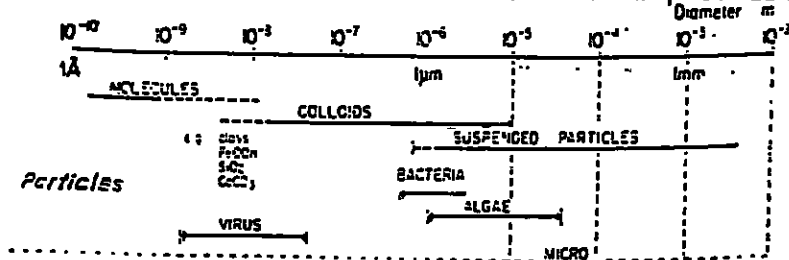
מטרת המחקר בשנה זו היתה לבחון את תהליכי השיקוע וההסעה הטבעיים המתרחשים בנחל. בחינת השיקוע כוללת מעקב אחר קצבי השיקוע בתחנות השונות, שינוי התפלגות החלקיקים לאורך הזמן ולאורך העמודה, מהות החומר (אורגני/מינרלי) ונתונים נוספים המסייעים בהערכת פוטנציאל השיקוע הטבעי בתחנות המייצגות לאורך הנחל והגורמים המשפיעים 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).

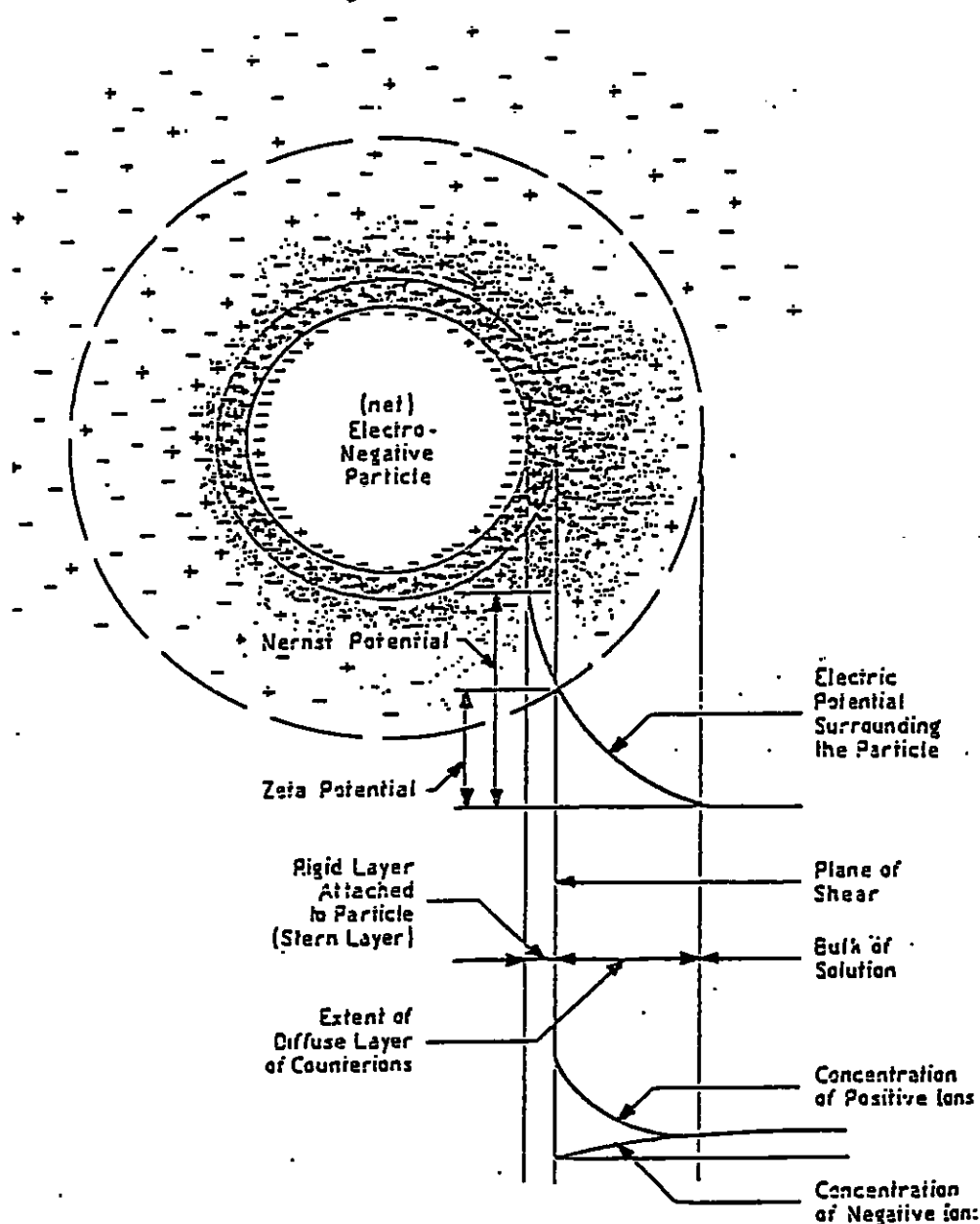
בדיון בתהליכים הפועלים על חלקיקים כגון קואגולציה, שיקוע ובכלל הפרדת מוצקים מנוזלים, קיימת התייחסות רבה לתהליכים המונעים ע"י אמצעים כימיים או פיזיקליים (למשל: מפתיתים) המזרזים את תהליכי השיקוע ומגבירים אותם. למעשה התהליכים הפועלים על חלקיקים, בין אם הם טבעיים ובין אם הם מונעים ע"י אמצעים מלאכותיים, הם 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 קולואידים - 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 קולואידים בעלי יציבות אין סופית, שהם אנרגטית או תרמודינמית יציבים. הם נקראים reversible colloids. קולואידים 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 ויאופיינו 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: γ 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.

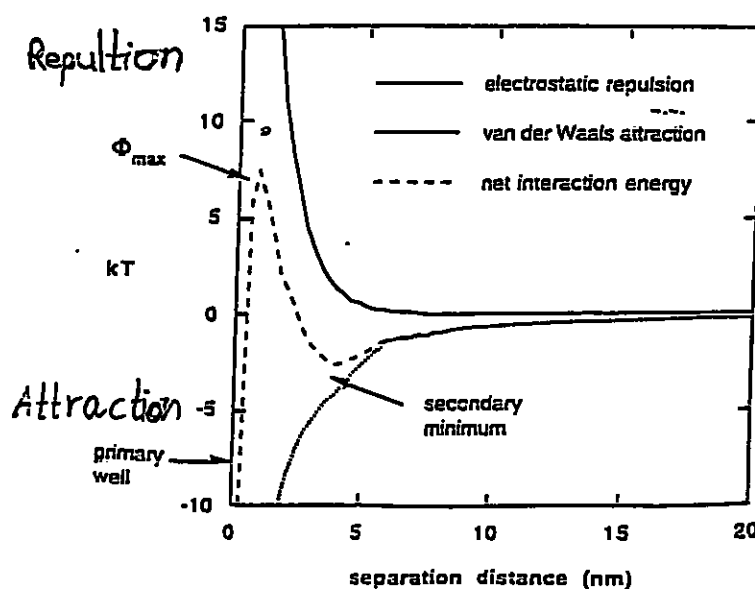
טמפרטורה משפיעה באופנים שונים על הקואגולציה: הטמפרטורה משפיעה על צמיגות הנוזל; מביאה לשינוי מבני של אגרגטים המתבטא בגודלם; משפיעה על האנרגיה החופשית של תרכובות אורגניות הספוחות אל פני שטח של חלקיקים ועל אנרגיית המים, דבר היכול להשפיע על תנועה דיפוזיבית.

מנת הקואגולנט בתהליכים טבעיים ההתייחסות 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):

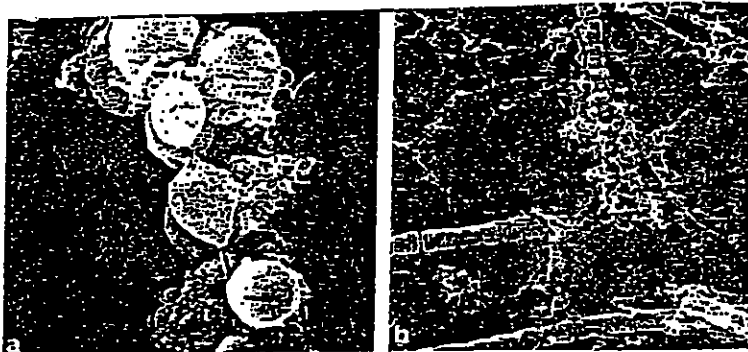
- טמפרטורת הסביבה משפיעה על צמיגות המים - טמפרטורה נמוכה תביא לצמיגות גבוהה בה מהירות השקיעה נמוכה וכן הטמפרטורה משפיעה על המצב הפיסיולוגי של התאים;
- עוצמת האור עלולה להשפיע ברמה ההתנהגותית על ה"פוטוטקסיס" של האצה;
- גודל וצורת האצה, להם חשיבות מרובה, בהתייחסות לאצה כאל חלקיק;
- רמת החמצן המומס במים 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

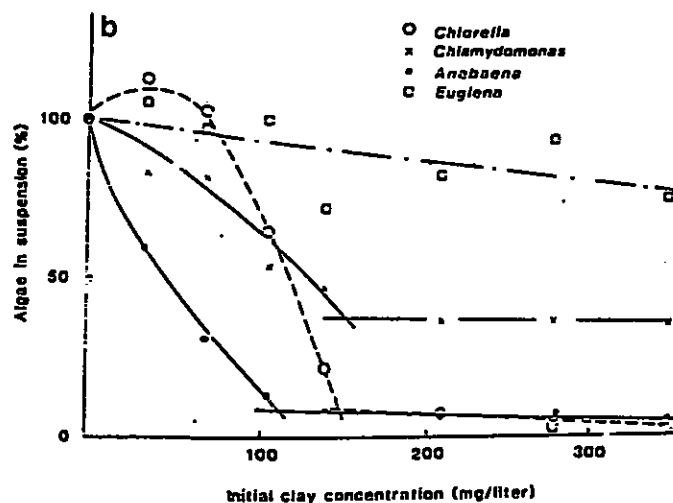
שיקוע אצות יחדיו עם חלקיקים יכול להתרחש בזכות פולימרים חוץ תאיים (ציור 5), בעיקר פוליסכרידים, אותם האצות מפרישות.



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 אגרגציה 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 האגרגציה השתנתה בקרב מיני האצות השונים: *Anabaena* הגיבה באגרגציה 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 האגרגציה, 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 המידי 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 הפוטוסינטטי; 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

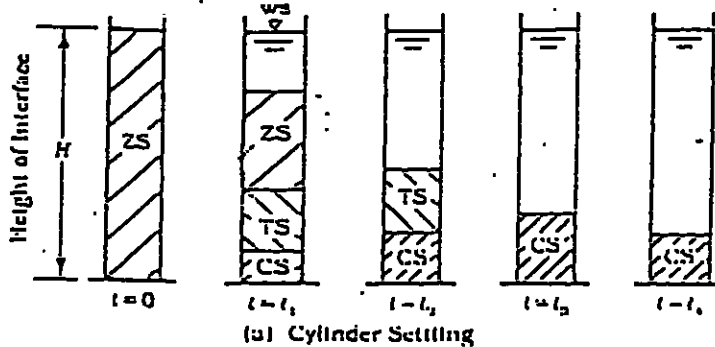
לגבי חלקיקים הנמצאים בטווח הגודל עליו משפיע כוח המשיכה ($> 1 \mu m$), ניתן להבחין במספר אופנים של שיקוע:

- 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), בנקודות הזמן הקודמות. 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).
 ולפי היחס האמפירי: (6)
 $C_D / (24 / R_c) = 1.00 E^{-0.38}$

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 $(\text{erg}^\circ \text{C}^{-1})$

μ = 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.

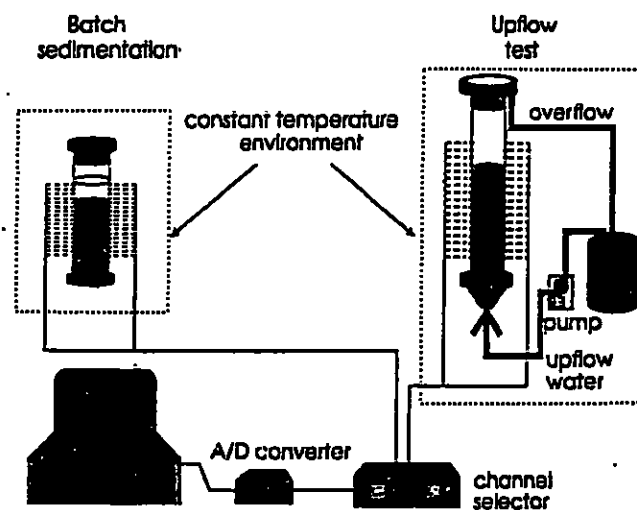
רוב הניסויים נעשו במעבדה אולם נערכו גם ניסויים השוואתיים בין עמודה שהוצבה על שפת מאגר דיר חוגלה לבין עמודת המים במאגר עצמו.

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 קוטרים 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 וגישה (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.

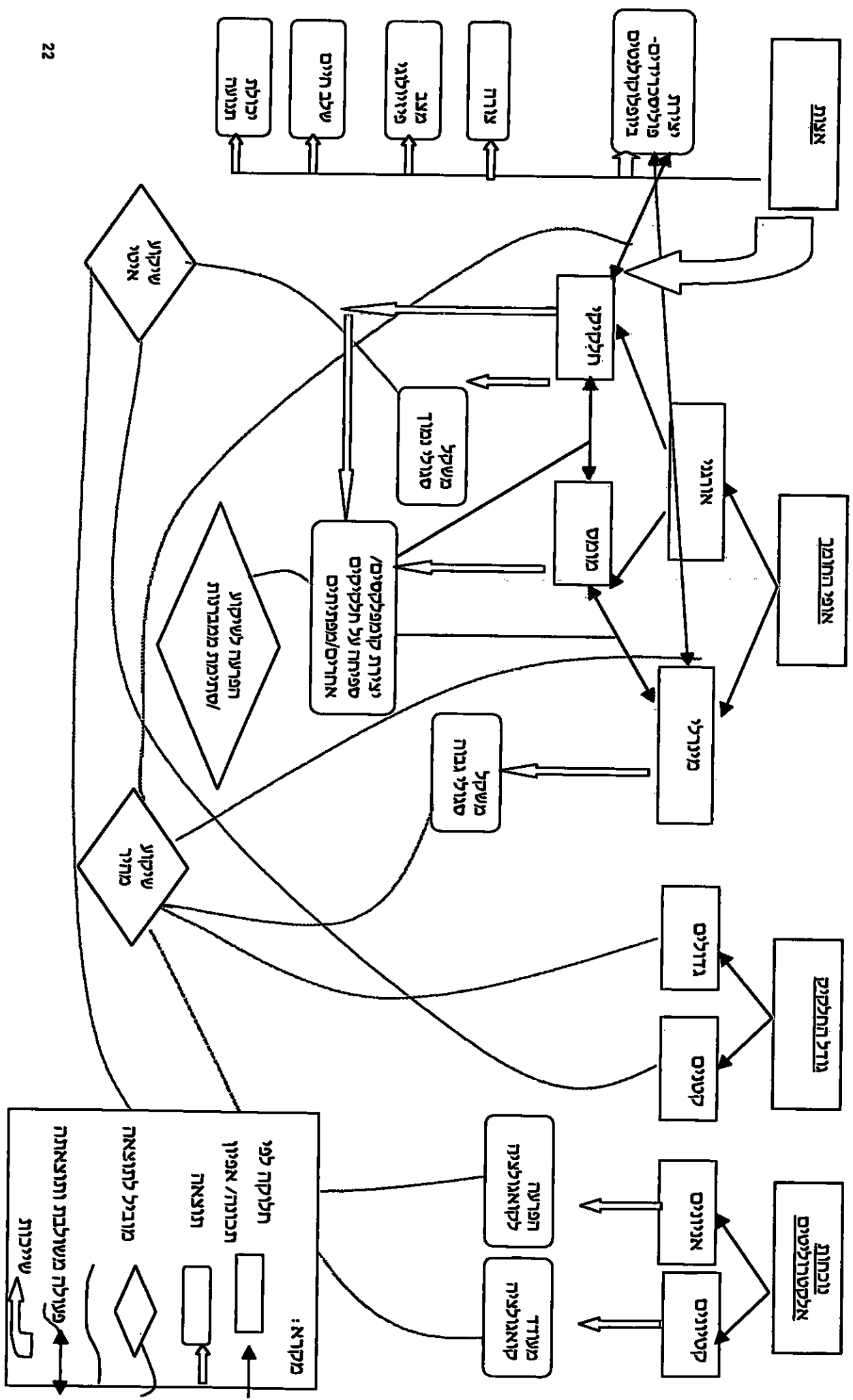
4. מודלים מתמטיים רבים קיימים לתאור וחיזוי שלבים שונים במהלך שיקועו של החלקיק. יש לדעת להגדיר את התהליכים המאפיינים את המערכת, כדי לבחור במערכת המשוואות הנכונה, שתיתן את החיזוי הקרוב ביותר למציאות. את החיזוי רצוי להשוות לניסויים ולמצוא את הדומה והשונה לשם הבנת התהליכים לאשורם.

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 וכו'. 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.

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



מקרא:

- חלוקה לפי תכונה/ אפיון תוצאה
- מוביל לתוצאה
- פעולה משולבת ותוצאתה
- שייכות

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- $\text{pH}=2$ 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 מעורבבת 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), בטמפי 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

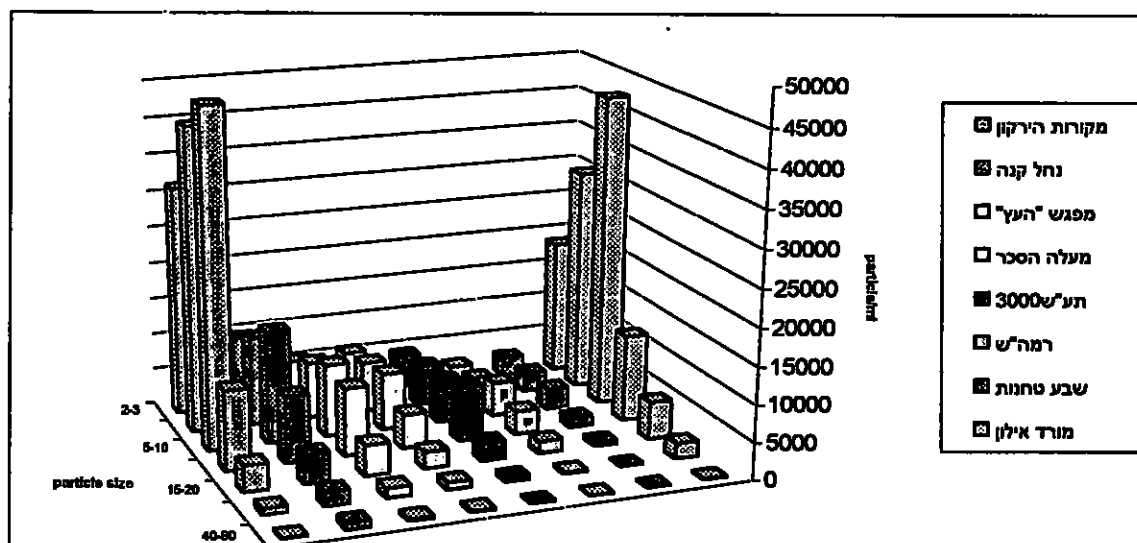
4.1 אפיון רציף של הנחל

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 10-15µm 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.

