# פיתוח תהליך חדשני לגידול דגים ברכז התפלת מי תהום

**דו"ח מסכם - שנה II**

**דר' סיון קלס,** המחלקה להנדסת ביוטכנולוגיה ע"ש פרופ' אפרים קציר, המכללה האקדמית להנדסה אורט בראודה, כרמיאל

**מר יעקב פרץ,** חברת אלג'י-סמארט בע"מ

**מר עידן רום,** הפקולטה להנדסה אזרחית וסביבתית, הטכניון

**מוגש לארגון מגדלי הדגים בישראל**

**ינואר, 2020**

# תקציר

ענף המדגה הישראלי סובל ממחסור כרוני במים איכותיים וממתח רווחים נמוך. בשנים האחרונות מוקמים מתקני התפלה למי תהום, והרכז שהם מייצרים מהווה מקור מים פוטנציאלי למדגה. בתצפית עבר נצפה שיקוע מאסיבי של קלציום-קרבונט (ק"ק) על גבי המוקוס והזימים של דגים שגודלו ברכז התפלה. בעבודה הנוכחית נבחן תהליך הרחקת סידן ("ריכוך") מהרכז באמצעות אוורור בלבד, שמטרתו למנוע בעיה זו. תוצאות המחקר בשנה הראשונה הראו 100% שרידה של דגי לברק שגודלו כשלושה חודשים ברכז מרוכך וברכז גולמי. הושגה עד כ-74% הרחקה של סידן מהרכז של מתקן ההתפלה של כפר מסריק, תוך יצירה של כ- 1.6 ק"ג חומר יבש למ"ק מי תמלחת. קצב הרחקת הסידן עלה עם ספיקת האוורור ועם ריכוז גרעיני הגיבוש. בשנת המחקר השניה נבנה מתקן ריכוך במדגה כפר מסריק שטיפל בכ- 10 מ"ק רכז ביום. דגי לברק גודלו ברכז גולמי, ברכז מטופל ובמי ביקורת שמקורם במדגה כפר מסריק, בתחלופת מים יומית של כ- 470%. מלבד אירועי תמותה שנקשרו להתפרצות של טפיל האאודיניום, נצפתה שרידה של מעל 92% בכל הטיפולים. במיכלי הדגים המוזנים ברכז גולמי נמדדה הרחקת סידן של 0.2 – 0.6 ק"ג ק"ק למ"ק, שהתבטאה בהצטברות מוצקים משמעותית בצנרת וע"ג הדפנות, דבר שהצריך ניקוי תכוף. קצבי גידול הדגים בבריכות שהוזנו ברכז מרוכך, היו גבוהים ב 11% וב 22% לעומת קצבי הגידול בבריכות שהוזנו ברכז גולמי ובמי ביקורת, בהתאמה. הדו"ח הפתולוגי הראה בריאות גבוהה של הדגים בכל סוגי המים, אם כי נצפה שיקוע סידן בזימי הדגים שגודלו ברכז גולמי. בבריכות הביקורת נמדדו ריכוזי אמוניה וניטריט גבוהים שנבעו ממי המקור, ובבריכות שהוזנו במי רכז נמדדו ריכוזי ניטראט גבוהים של כ- 180 מג"ל. הרחקת הסידן במתקן הריכוך עמדה על כ- 1.2 ק"ג קלציום קרבונאט (ק"ק) למ"ק (57% הרחקה). התגלה קושי בערבול המוצקים וסחרורם עקב שיקוע סידן במשאבות ובצנרת, דבר שגרם להצטברות משקעים בצנרת ובמיכלי הריכוך. עקב בעיות אלו ריכוז המוצקים המרחפים במתקן היה 0.6 גרם לליטר בלבד. הגדלת הריכוז ל- 12 גרם לליטר צפויה להכפיל את קצבי הרחקת הסידן ולהקטין בהתאם את עלויות התהליך. ניסויי ריכוך ראשוניים בראקטור מעבדתי רציף הראו הרחקת סידן פחות טובה מזו שהתקבלה בניסויים המנתיים המיטביים. בימים אלו נערכים ניסויי המשך במטרה לשפר את הביצועים.

## 1. מבוא ומסקנות משנת המחקר הראשונה

בשנים האחרונות מוקמים מתקני התפלת מי תהום המהווים מקור מים אטרקטיבי לגידול דגי איכות, דבר שעשוי לעזור למדגה הישראלי הסובל ממחסור כרוני במים איכותיים וממתח רווחים נמוך. בתצפית עבר התברר שגידול דגים ברכז התפלה אינו אפשרי עקב שיקוע מינרלי ע"י המוקוס והזימים.

בשנת המחקר הראשונה נמצא שדגי לברק שרדו באופן מלא במשך שלושה חודשים במי רכז שרוככו באמצעות אוורור בלבד, וכן במי רכז גולמיים בתנאי מעבדה. בניסוי ברכז הגולמי, התרחש שיקוע קלציום קרבונאט (ק"ק) בביופלטר שדרש ניקוי תכוף. התברר כי המשקע המתקבל בתהליך הריכוך מורכב רובו ככולו מק"ק. בניסויים מנתיים נמצא כי ספיקת האיוור וריכוז גרעיני הגיבוש הגדילו ביחס ישר את קצב הרחקת הסידן, כאשר לקצב האיוור השפעה גדולה פי 20 לערך על קצב הרחקת הסידן, ביחס לריכוז גרעיני הגיבוש. קצב הרחקת הסידן המרבי שנמדד היה 1.05 גרם לליטר כק"ק בשעה, תחת איוור של 1.045 ליטר לדקה וריכוז גרעיני גיבוש של 10 גרם לליטר. תהליך הריכוך הוביל להרחקה מקסימלית של 1.6 גרם לליטר כק"ק (74% הרחקה). זמני השהייה ההידראוליים המוערכים להרחקה מלאה של הסידן (עד לש"מ) הוערכו בכ- 4 שעות לפחות. נמצא כי הפרדת המוצקים מן המים צפויה להיות פשוטה יחסית. בס"ה, תוצאות השנה הראשונה הצביעו על היתכנות מסחרית לתהליך.

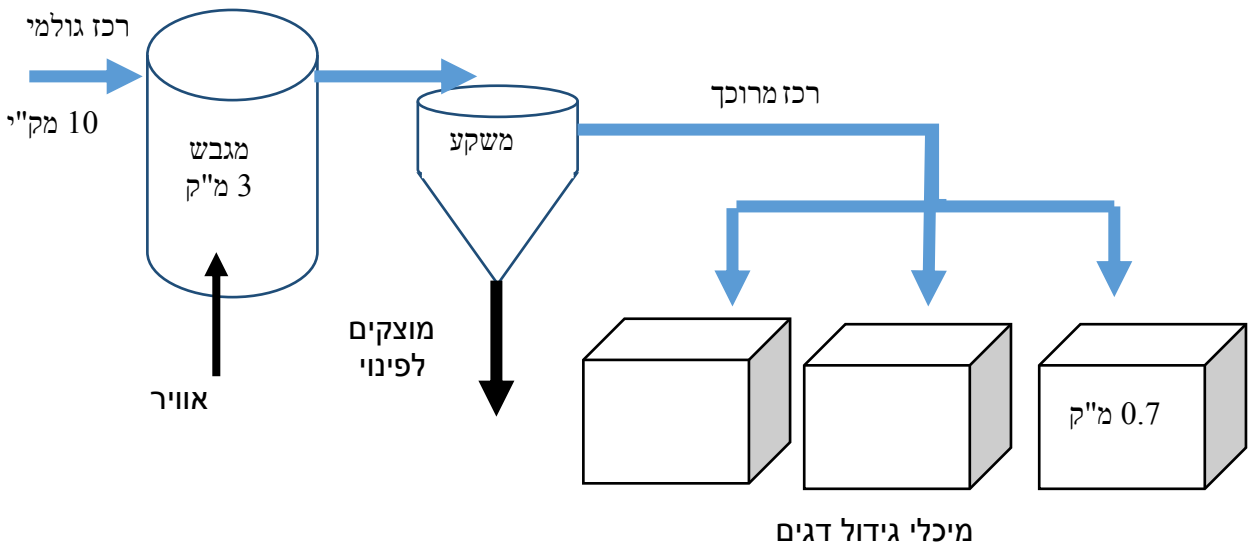
מטרת המחקר בשנה השניה היתה לבחון שרידה וקצבי גידול דגים במערכת flow-through המדמה גידול דגים מסחרי, במי רכז ובמי רכז מרוכך. מטרה נוספת היתה לבחון את נושא הריכוך הרציף בקנה מידה מעבדתי ( כ- 35 ליטר ליום) ובשטח (כ 10 מ"ק ליום).

## 2. חומרים ושיטות

**2.1 מתקן הניסוי בכפר מסריק.** במערכת הפיילוט גודלו דגי לברק בשלושה סוגי מים: רכז גולמי, רכז מרוכך ומי בריכת דגים פעילה (שאינה קשורה לניסוי) כביקורת (במקור הגיעו ממי שיטפונות וממי נקז תת קרקעי). המערכת הוקמה במדגה כפר מסריק תוך שימוש ברכז של מתקן ההתפלה של כפר מסריק. שני סוגי הרכז הוזרמו כל אחד בספיקה זהה למיכלי גידול דגים, כאשר מי הביקורת הוזרמו בספיקה כפולה עקב ריכוזי הניטריט והאמוניה הגבוהים יחסית בהם. בס"ה נבנו 9 מיכלי דגים (3 חזרות לכל סוג מים) שנפח המים בכל אחד מהם 0.7 מ"ק. מתקן הריכוך (שיקוע סידן כק"ק) נבנה משני מיכלי פלסטיק בנפח 1.5 מ"ק כ"א שחוברו בטור, כאשר לכל אחד מהם הוכנס צינור אוויר בעל 6 יציאות אופקיות בקוטר של כ- 0.7 ס"מ. האוויר הוזרם באמצעות מפוח מסוג RENOVA IRSC בעל הספק 1.5 kW, אשר מייצר ספיקה של כ- 130 מק"ש, שבחלקה הופנתה לאוורור מיכלי הדגים. תמונות של מערכת הריכוך וגידול הדגים מוצגות באיור 2.1.

**איור 2.1. תמונות של מתקן החלוץ במדגה כפר מסריק**

ניסיונות לערבול המוצקים במיכלי הריכוך באמצעות משאבה וניסיונות להחזרת מוצקים למערכת לצורך הגדלת ריכוז גרעיני הגיבוש לא צלחו עקב סתימת המשאבה במוצקים ששקעו בחלקיה הפנימיים. אי לכך, הערבול היחיד התבצע באמצעות בועות האוויר, ולא הספיק להרחפת כל המוצקים. בעיית הערבול גרמה לריכוז גרעיני גיבוש נמוך יחסית של 0.6 גרם לליטר בלבד. התמלחת עם חלקיקי המוצקים שנוצרו במיכלי השיקוע זרמה למשקע שתפקידו הפרדת המוצקים מהרכז באמצעות שיקוע גרוויטציוני. ממתקן השיקוע זרמה התמלחת הנקייה ממוצקים אל מיכלי גידול הדגים, כמתואר בסכמה המוצגת באיור 2.2.




**איור 2.2.** סכמה תפעולית של מתקן הריכוך ומיכלי גידול הדגים

מתקן הריכוך הוזן בספיקת מים של כ- 10 מ"ק ליום. אי לכך, זמן השהייה ההידראולי הכולל בשני המגבשים היה כ- 7 שעות וזמן השהיה ההידראולי במיכלי גידול הדגים היה כ 5.6 שעות (כ- 5 החלפות ביממה של נפח הגידול).

**2.2 פרוצדורת ניסוי גידול דגים ברכז התפלה.** דגי לברק במשקל של כ 5 גרם אוכלסו בחודש יוני 2019 במיכלי הגידול שהוזנו כולם במי ביקורת. החל מיולי, 6 הבריכות שיועדו לקבל מי רכז מרוככים או גולמיים (מיכלים 4 - 9) הוזנו ברכז מרוכך ובמי ביקורת בו זמנית לצורך איקלום. הניסוי החל ב 1.8.19, שבו נספרו ונשקלו הדגים (באמצעות מדידת נפח של כ- 10 דגיגים) ובוצעו העברות לקבלת מספר 84 – 95 דגים למיכל. לאחר כיומיים הופסקה כניסת מי הביקורת למיכלים 4 – 9, כאשר מיכלים 4 – 6 החלו לקבל רכז גולמי בלבד ומיכלים 7 – 9 החלו לקבל רכז מרוכך בלבד. מיכלים 1 – 3 המשיכו לקבל מי ביקורת בספיקה של 5 - 8 מ"ק ליום לכל מיכל. הדגים הואכלו במזון מסוג צמח 4992 לדניס בעל תכולת חלבון ושומן של 51% ו- 18%, בהתאמה. האכלה התבצעה פעם או פעמיים ביום, למעט סופי שבוע, באופן ידני עד לשובע. לאורך הניסוי התבצע מעקב במיכלי הדגים ובמי ההזנה אחר ריכוזי חמצן, מוליכות, pH וטמפרטורה במכשירים ניידים. בנוסף, התבצעו מדידות של אמוניה, ניטריט וניטראט באמצעות בדיקות קולורימטריות ( Spectroquant, Merck), וכן מדידת סידן ואלקליניות באמצעות טיטרציות EDTA וגראן, בהתאמה. בתחילת הניסוי, באמצעו ובסופו נלקחו שני דגים מכל מיכל לבדיקה פתולוגית במעבדה המרכזית לבריאות הדג בניר דוד. בסוף הניסוי כל הדגים נספרו ונשקלו.

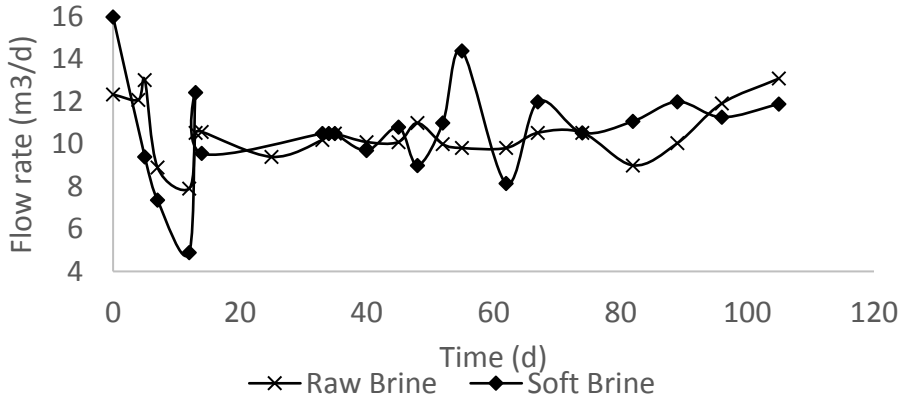
### 2.3 ניסויי מעבדה בראקטור ריכוך רציף

בשנת המחקר הראשונה בוצעו ניסויי מעבדה מנתיים על מנת למצוא פרמטרים קינטיים של תהליך הריכוך של הרכז. בשנה השניה החל לפעול ראקטור מעבדתי רציף לריכוך הרכז. הראקטור הוזן ברכז ממתקן ההתפלה של כפר מסריק במטרה לבחון את ההשפעה של ספיקות הרכז (זמן שהיה הידראולי), ספיקת האוויר וריכוז גרעיני הנוקלאציה על יעילות הרחקת הסידן. הראקטור שהופעל הנו מסוג "בוצה משופעלת" ומורכב מקולונה בנפח 2 ליטר שבה מתבצע הריכוך וממיכל שיקוע קוני בנפח 1.5 ליטר, שתפקידו להפריד את המוצקים ולהחזירם לראקטור. הראקטור נבחש באמצעות בוחש מגנטי והמוצקים סוחררו באמצעות משאבה פריסטלטית. הפרמטרים שנמדדו היו ריכוזי הסידן, האלקליניות, pH, מוליכות, טמפ' ועכירות בקולחים. בנוסף נמדד ריכוז המוצקים המרחפים בראקטור.

## 3. תוצאות

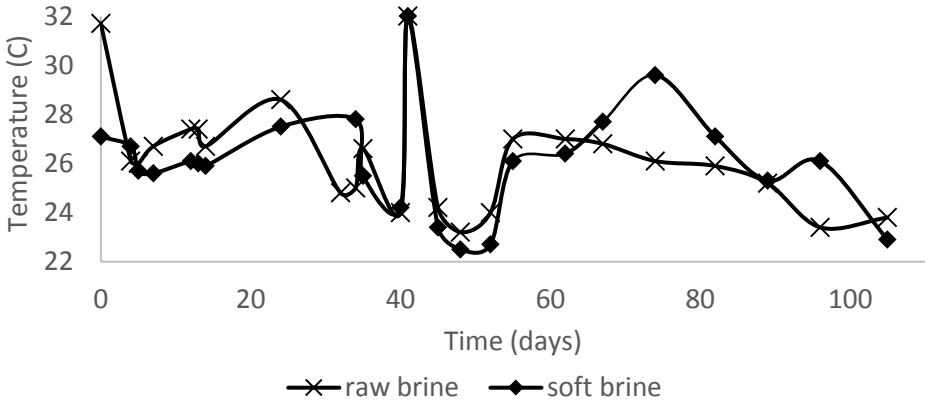
### 3.1 מתקן הריכוך בכפר מסריק

איור 3.1 מציג את ספיקות הרכז הגולמי והרכז המרוכך לפני חלוקת המים למיכלי גידול הדגים לאורך הניסוי. ניתן לראות שהספיקות היו דומות בשני סוגי המים ונעו בד"כ בין 10 ל- 12 מ"ק ליום. מנתונים אלה נמצא שזמני השהיה ההידראוליים בבריכות הגידול ובראקטור הריכוך היו 4.2 – 5 שעות ו- 6 – 7 שעות, בהתאמה.



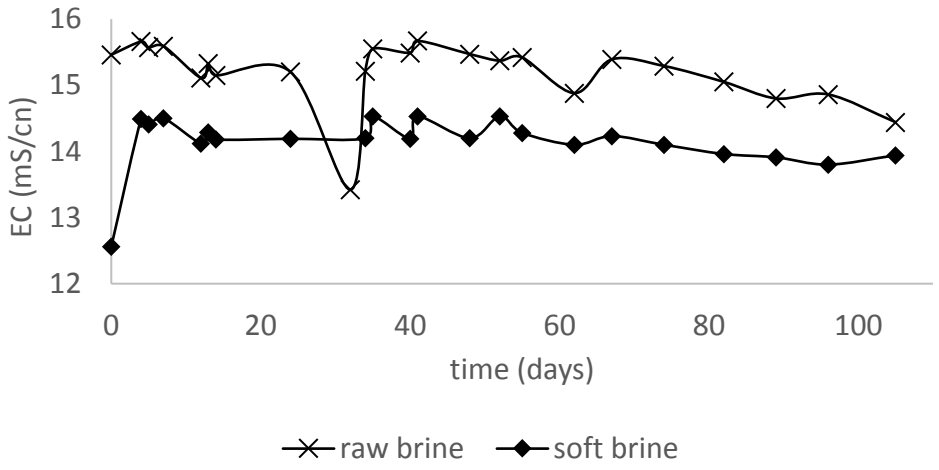

**איור 3.1**. ספיקות הרכז הגולמי והמרוכך לאורך הניסוי.

איור 3.2 מציג את הטמפ' של הרכז הגולמי והמרוכך לאורך הניסוי. ניתן לראות שהטמפ' של שני סוגי המים היתה בד"כ דומה ונעה לרוב בין 22 ל- 28 מ"צ. הטמפרטורה של הרכז הגולמי בנקודת היציאה מצינור הובלת הרכז הראשי נמדדה פעם אחת, בתקופת החורף ועמדה על 22 מ"צ. בהנחה שטמפרטורה זו היתה קבועה לאורך הניסוי, כנראה שהטמפרטורות הגבוהות של הרכז בכניסה למתקן הניסוי נבעו מכך שהניסוי התרחש בין אוגוסט לתחילת נובמבר, כאשר הטמפ' לאורך היום הגיעו ל- 30 מעלות לפחות, דבר שאפשר למים להתחמם בצינור ההובלה שהונח חשוף על הקרקע ובמתקן עצמו.



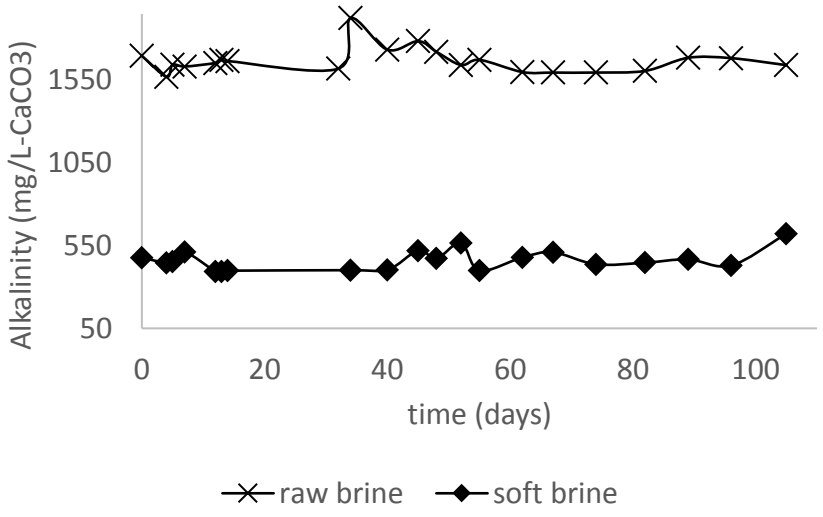

**איור 3.2**. הטמפ' של הרכז הגולמי והמרוכך לאורך הניסוי

באיור 3.3 מוצגת המוליכות החשמלית של הרכז הגולמי והמרוכך לאורך הניסוי. ניתן לראות שהמוליכות ברכז הגולמי היתה בד"כ 15.5 mS/cm וירדה מעט לקראת סוף הניסוי. המוליכות של הרכז המרוכך עמדה על כ- 14.3 mS/cm וגם היא ירדה מעט לקראת סוף הניסוי. הירידה במוליכות נקשרה עם הרחקת יוני הסידן והביקרבונאט בתהליך.



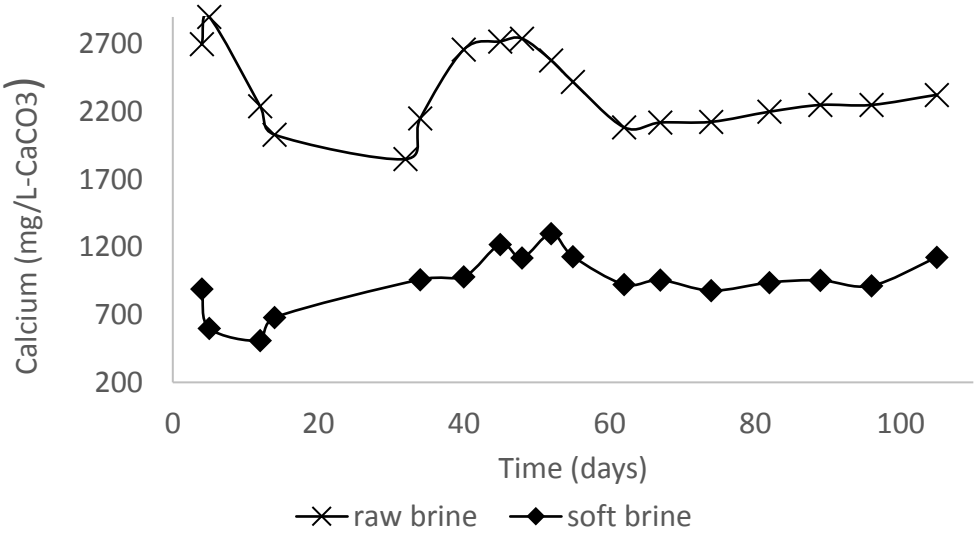

**איור 3.3.** המוליכות החשמלית של הרכז הגולמי והמרוכך לאורך הניסוי

באיור 3.4 מוצגת האלקליניות של הרכז הגולמי והמרוכך לאורך הניסוי. ניתן לראות שהאלקליניות בשני סוגי המים נשמרה קבועה פחות או יותר לאורך הניסוי ועמדה על כ- 1600 ו- 440 מג"ל כק"ק, בהתאמה. ההפרש באלקליניות בין הרכז הגולמי למרוכך עמד על 1160 - 1220 מג"ל כק"ק. הירידה באלקליניות נובעת כתוצאה מהרחקת הקרבונאט ששוקע עם הסידן ביחס 1:1. אי לכך, הרחקת האלקליניות הנה מדד מדויק להרחקת הסידן.




**איור 3.4.** האלקליניות של הרכז הגולמי והמרוכך לאורך הניסוי

ריכוזי הסידן ברכז הגולמי והמרוכך לאורך הניסוי מוצגים באיור 3.5. ניתן לראות שריכוזי הסידן משתנים בצורה משמעותית לאורך הזמן, כאשר ברכז הגולמי ריכוזי הסידן נעו בין 1900 ל- 2900 מג"ל כק"ק וברכז המרוכך בין 500 ל- 1300 מג"ל כק"ק. שינויים אלו הוסברו בכך שמדידת קשיות הסידן יכולה לתת תוצאות לא מדויקות כאשר היא מבוצעת ע"י עובד לא מיומן. הערכים האופייניים היו 2,150 ו- 920 מג"ל כק"ק ברכז הגולמי והמרוכך בהתאמה, אשר מראים הרחקת סידן של 1,230 מג"ל כ-ק"ק (57% הרחקה), המתאימה לערך שנמצא מתוך מדידת האלקליניות, שנחשבת יותר מדויקת ואמינה.

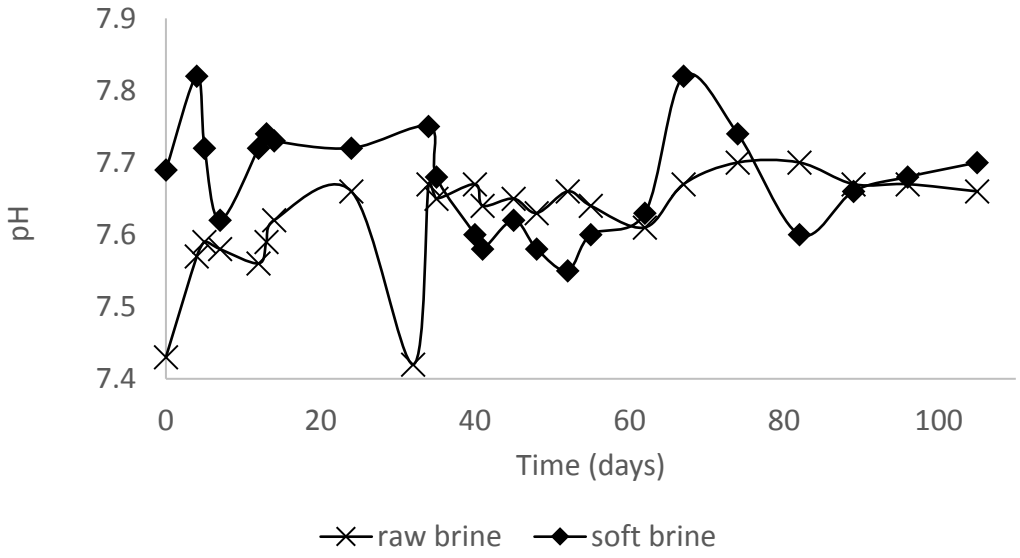



**איור 3.5.** ריכוזי הסידן ברכז הגולמי והמרוכך לאורך הניסוי

מתוך איורים 3.4 ו- 3.5, ניתן לסכם שהרחקת הסידן במתקן הריכוך עמדה על 0.03 ± 1.19 גרם ק"ק לליטר. הרחקה זו הושגה בזמן שהיה הידראולי של 7-6 שעות, כאשר בניסויים מנתיים ההרחקה המקסימלית הגיעה לכ- 1.6 גרם ק"ק לליטר (73% הרחקה), בזמן שהיה של כ- 4 שעות (תנאים מיטביים). הביצועים הנמוכים יחסית, נקשרו בעיקר לספיקת האוויר במיכלי הריכוך. בהנחה שספיקת האוויר שנכנסה למתקן הריכוך בכפר מסריק היתה 100 מק"ש, מדובר בספיקת אוויר סגולית של 14 מ"ק אוויר למ"ק ראקטור לשעה. ספיקת האוויר בניסויים המנתיים המיטביים עמדה על 62 מ"ק אוויר למ"ק ראקטור לשעה, דהיינו ספיקה גדולה פי 4.4. בניסויים המנתיים נמצא כי ספיקת האוויר הנה הגורם המשמעותי ביותר המשפיע על הקינטיקה של הרחקת המוצקים. סיבות נוספות לביצועים הנמוכים יכולות קשורות גם לגודל בועות האוויר שהיה גדול יחסית (שטח קטן יותר יחסית למעבר מסה), לפיזור פחות טוב של בועות האוויר ולריכוז נמוך של גרעיני גיבוש (0.6 גרם לליטר במתקן הנכחי, לעומת 10 גרם לליטר במתקן המעבדתי שבו התקבלו קצבי הרחקה מקסימליים). הסיבות שבגינן, הרחקת הסידן היתה בכל זאת סבירה, הנן זמן השהיה ההידראולי הארוך יחסית וכן גובה המים בראקטור הריכוך בכפר מסריק שהיה כ- 1.5 מטר

לעומת כ- 30 ס"מ במתקן המעבדתי. דבר זה איפשר זמן מגע ארוך יותר של האוויר עם המים וכתוצאה מכך, חילוף גזים יעיל יותר.

איור 3.6 מציג ה pH שנמדד ברכז הגולמי והמרוכך לאורך הניסוי. ניתן לראות שערכי ה pH היו דומים בין שני סוגי המים, בניגוד לניסויים המנתיים בהם ה pH עלה בלמעלה מיחידה בזמן תהליך הריכוך. הבדל זה הוסבר בכך שבטיפול המנתי מתחילה הרחקת הסידן רק לאחר כחצי שעה שבה מתרחש בעיקר נידוף פד"ח. תוצאות אלו מראות שביצוע תהליך הריכוך באמצעות אוורור בצורה רציפה אינה גורמת לשינוי pH.




**איור 3.6**. ה pH שנמדד ברכז הגולמי והמרוכך לאורך הניסוי

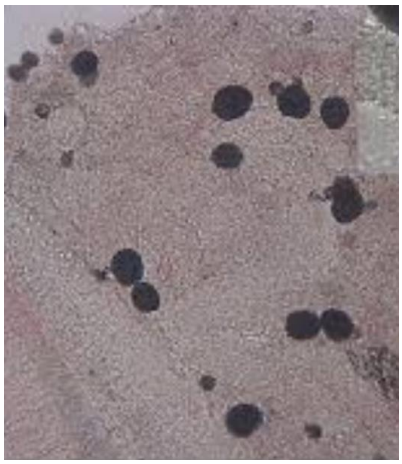
ריכוזי תרכובות החנקן האופיינים שנמדדו ברכז הגולמי והמרוכך היו דומים ועמדו על 136 – 157 מג"ל ניטראט, 0 – 2 מג"ל אמוניה ו- 0 – 0.15 מג"ל ניטריט. נתונים אלה מצביעים על כך שבגידול דגים אינטנסיבי הכולל ניטריפיקציה עשויה להיווצר בעיית ניטראט משמעותית.

ניתן לסכם שיחידת הריכוך פעלה בצורה סבירה, אולם ניתן לשפר את הביצועים משמעותית מבחינת יעילות וקצבים. הגדלת ספיקת האוויר תאפשר הרחקה מהירה יותר של הסידן, אולם כרוכה בעלות אנרגיה גבוהה יותר. הוספת בחישה תמנע הצטברות משקעים בתוך מיכלי הריכוך ותאפשר עבודה בריכוז גרעיני גיבוש גבוה, דבר שצפוי להגדיל את קצב התגובה, כמעט ללא עלויות אנרגיה נוספות. עקב היעדר הבחישה וסחרור מוצקים ריכוז גרעיני הגיבוש בראקטור הריכוך היה סביב 0.6 גרם לליטר. עפ"י תוצאות הניסויים המנתיים, הגדלת ריכוז גרעיני הגיבוש פי 20 (לריכוז של 12 גרם לליטר שהוא פרקטי מאוד), צפויה להגדיל את קצבי הרחקת הסידן פי 2. קצב הרחקת הסידן במתקן ההרחקה עמד על 1.7 ק"ג-ק"ק למ"ק ליום ומכאן שהגדלת ריכוז גרעיני הגיבוש פי 20, צפויה להגדיל את קצב

ההרחקה ל- 3.4 ק"ג למ"ק ליום. הכפלת הקצב תאפשר הכפלה של הספיקה והורדת עלות האנרגיה למ"ק בהתאם (למחצית). יצוין שקצב של 3.4 ק"ג למ"ק ליום שווה בערך לשליש מקצב הרחקת המוצקים הממוצע המיטבי שהתקבל בניסויי המעבדה המנתיים, מאחר וספיקת האוורור במעבדה היתה גבוהה יותר באופן יחסי.

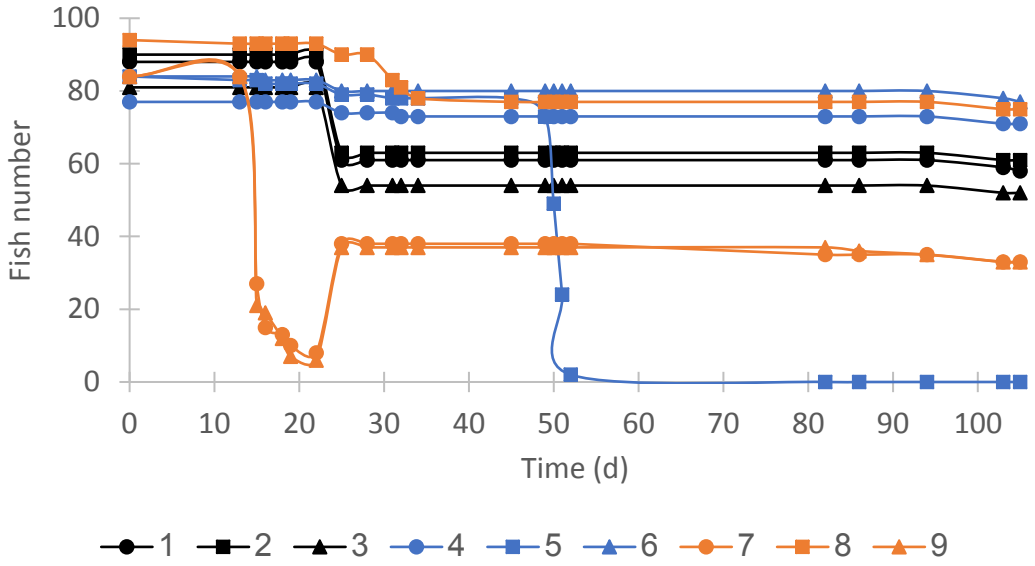
### 3.2 גידול הדגים ברכז התפלה

**שרידה.** הניסוי החל בתאריך 1.8.19, עם ספירה ושקילה של הדגים. מיכלי הדגים מוספרו 1-9, כאשר מיכלים 1 - 3 היו מיכלי הביקורת (מי בריכות דגים), מיכלים 4 - 6 הוזנו בתמלחת גולמית ומיכלים 7 – 9 הוזנו ברכז מרוכך ממתקן הריכוך שתואר לעיל. מספר הדגים ההתחלתי במיכלי הגידול נע בין 84 ל- 95. עד תאריך 15.8.19 לא נצפו תמותות (למעט דג אחד במיכל 8 ואחד במיכל 5). בתאריך 15-16.8.19 התרחשה תמותה של כמעט כל הדגים במיכלים 7 ו- 9 (רכז מרוכך), כאשר בשאר המיכלים לא נצפתה תמותה כלל (כולל מיכל 8). סיבת התמותה לא ידועה והוצעו שני הסברים. ההסבר הראשון הנו שילוב שני גורמים: א. הפסקת פעולת משאבת החזרת המים ממיכל סילוק המוצקים למערכת עקב תקלה במשך כ- 20 שעות, שבהן לא הוזרמו מים טריים לבריכות 7 - 9. ב. במהלך השבועיים הראשונים לניסוי לא נוקתה קרקעית המיכלים ונצפתה שכבה אנאירובית בקרקעית. ייתכן שהפסקת הזרמת המים במקביל לשחרור סולפידים וניטריטים גרמה לתמותה במיכלים 7 ו- 9. הסבר אחר, יותר סביר הנו מחלה. זאת משום שתופעה דומה מאוד התרחשה בתאריכים 20 – 22 לספטמבר בהם מתו כל הדגים במיכל 5. באירוע זה התגלה טפיל *Oodinium* ע"ג הדגים במיכל 5 בלבד. תמונות של הטפיל שהתגלה מוצגות באיור 3.7.



**איור 3.7**. תמונות של טפיל Oodimium שנתגלה במיכל 5 בתאריך 21.9.19.

בעקבות התמותה שהתרחשה באמצע אוגוסט נוקתה הקרקעית של כל המיכלים אחת לשבוע. לאחר אותו אירוע הועברו דגים ממיכלי הביקורת למיכלים 7 ו- 9 לצורך המשך הניסוי. לאורך הניסוי התבצע מעקב אחר מספר הדגים בכל מיכל ומספר זה הושווה בסוף הניסוי למספר שהתקבל בספירה הסופית. חוסר ההתאמה בין המספרים נע בין 1.7% ל-2.9% ויכול היה לנבוע מטריפה, תמותה שלא נספרה, בריחת דגים דרך המגלש וכן טעויות ספירה. יצוין שבמיכלים 1 – 3 (ביקורת) העכירות לא איפשרה לראות לעומק של יותר מכ-20 ס"מ, בניגוד למיכלי הרכז שהיו צלולים. איור 3.8 מציג את מספר הדגים במיכלים השונים עם הזמן, לאחר תיקונים שהתחשבו במספר הדגים הסופי (דהיינו הוספה / גריעה של דגים שגורלם לא ידוע).

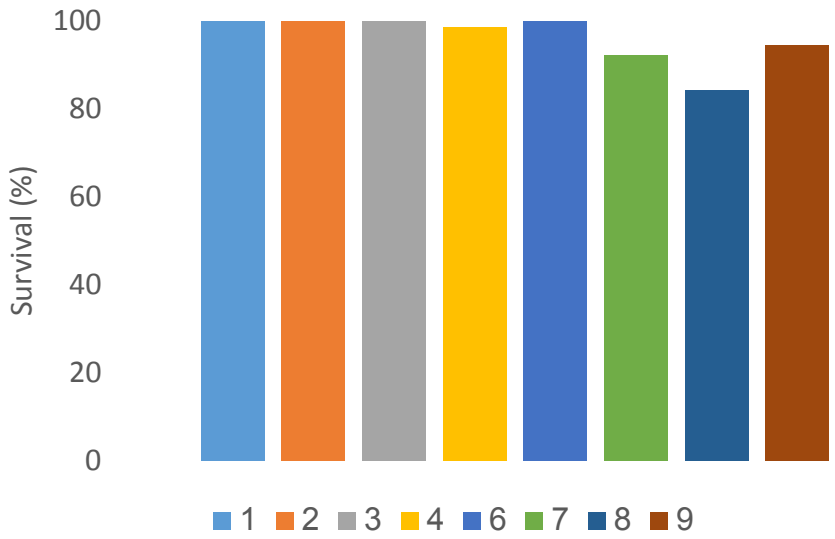



**איור 3.8**. מספר הדגים במיכלי הגידול לאורך הניסוי.

באיור 3.8 ניתן לראות שמספרי הדגים במיכלי הביקורת (1 - 3) היו דומים מאוד וכמעט שלא השתנו לאורך הניסוי, למעט העברה שבוצעה לאחר כ- 25 יום ממיכלים אלו למיכלים 7 ו- 9 בהם התרחשה התמותה. במיכלי הרכז הגולמי (4 - 6) מספרי הדגים היו דומים לאורך הניסוי וכמעט לא השתנו, למעט התמותה עקב מחלה בספטמבר במיכל 5. מספר הדגים במיכלים 7 ו- 9 היה דומה מאוד וניתן לראות את הירידה במספר הדגים עקב התמותה באוגוסט והעליה כתוצאה מהוספת דגים ממיכלי הביקורת. במיכל 8 היו יחסית הרבה תמותות בין יום 22 ליום 34 מתחילת הניסוי מסיבה לא ידועה.

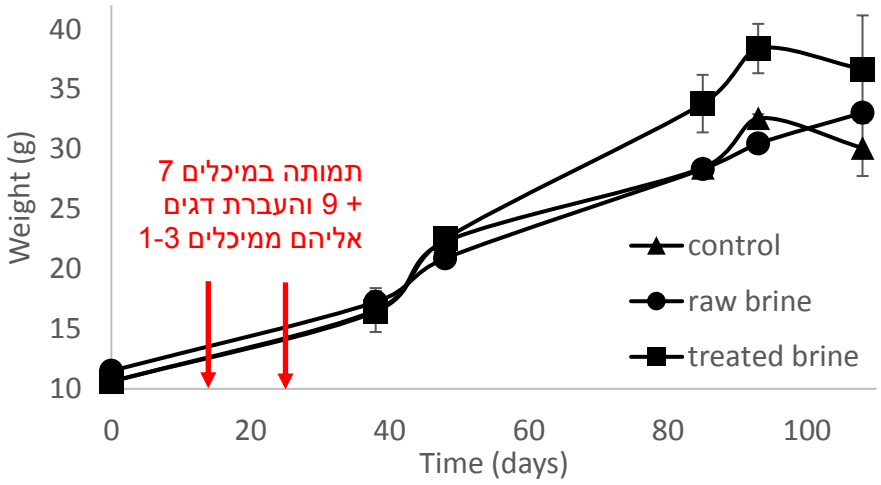
לאור התמותות שהיו במיכלים 5, 7 ו- 9, הוחלט שתוצאות הניסוי יתייחסו בעיקר לתקופה שהחלה בספטמבר 2019, וללא התחשבות במיכל 5. איור 3.9 מציג את אחוזי השרידה

במיכלי הניסוי בין 1.9.19 ל- 14.11.19. ניתן לראות כי השרידה במיכלי הביקורת היתה 100%, ושרידה דומה (99.3%) היתה גם במיכלי הרכז הגולמי. במיכלי הרכז המרוכך השרידה היתה נמוכה יותר ועמדה על 92.1%. בס"ה ניתן לסכם ולומר שהשרידה בכל מיכלי הגידול היתה גבוהה, למעט אירועי התמותה שנבעו כנראה כתוצאה ממחלת האאודיניום.




**איור 3.9**. שרידה מתאריך 1.9.19 (31 יום מתחילת הניסוי).

**קצבי גידול.** איור 3.10 מציג את משקל הדגים שנמדד לאורך הניסוי מתחילתו ב 1.8.19 ועד לסופו ב- 14.11.19.




**איור 3.10.** משקל הדגים לאורך הניסוי

ניתן לראות שהדגים במיכלי הביקורת ובמיכלי הרכז הגולמי גדלו בקצב דומה מאוד, כאשר הדגים ברכז המטופל גדלו בקצב גדול משניהם. בסוף הניסוי היה משקל הדגים שגדלו ברכז המרוכך גבוה ב 11% מהדגים שגדלו ברכז גולמי וב 22% מהדגים שגדלו במי הביקורת.

### 3.3 איכות המים במיכלי הדגים

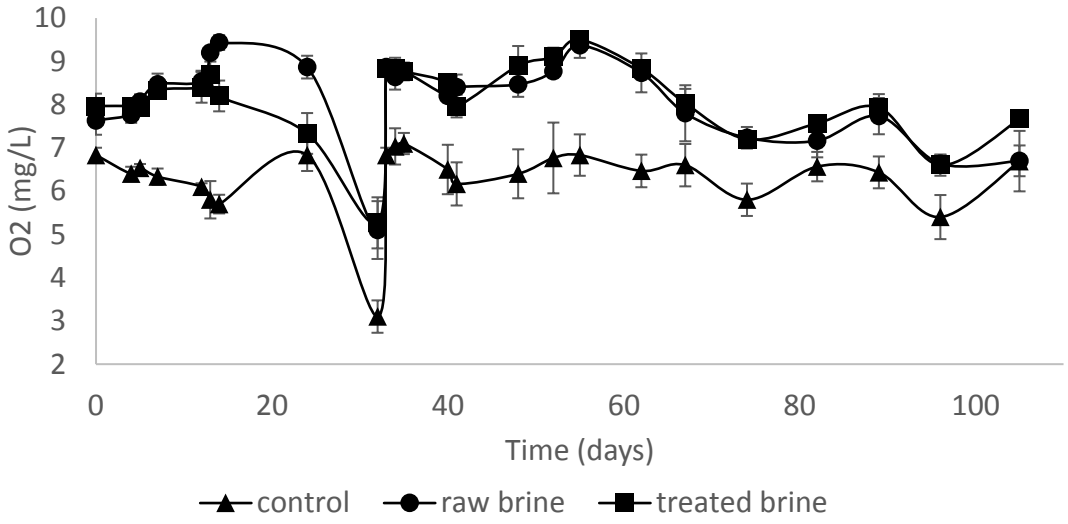
**תצפיות וזואליות**. המים במיכלי הרכז הגולמי והמרוכך היו צלולים לאורך כל הניסוי, בעוד שהמים במיכלי הביקורת היו עכורים מאוד בצבע ירוק כהה. תופעה בולטת נוספת היתה שיקוע מינרלי ע"ג הדפנות והאביזרים במיכלי הרכז הגולמי (4 - 6). איור 3.11 מראה דפנות של בריכת רכז מרוכך ובריכת רכז גולמי.

**איור 3.11**. צילום דופן של מיכל המוזן ברכז מטופל (ימין) ומיכל המוזן ברכז גולמי (שמאל)

ניתן לראות באיורים 3.11 ו- 3.12 שכבה מינרלית שנוצרה במיכלי הרכז הגולמי שהגיעה לעובי של מעל ס"מ. חלקים משכבה זו נטו להישבר ולפול לקרקעית המיכלים. באיור 3.12 מוצגים גם אביזרים שונים כגון צינור אוויר וצינור מי יציאה בבריכות הרכז הגולמי שנסתמו באבנית. את צינורות האוויר היה צורך לנקות בערך אחת לשבוע ואת צינור היציאה מהבריכות (קוטר של 5 ס"מ) אחת לחודש לערך.

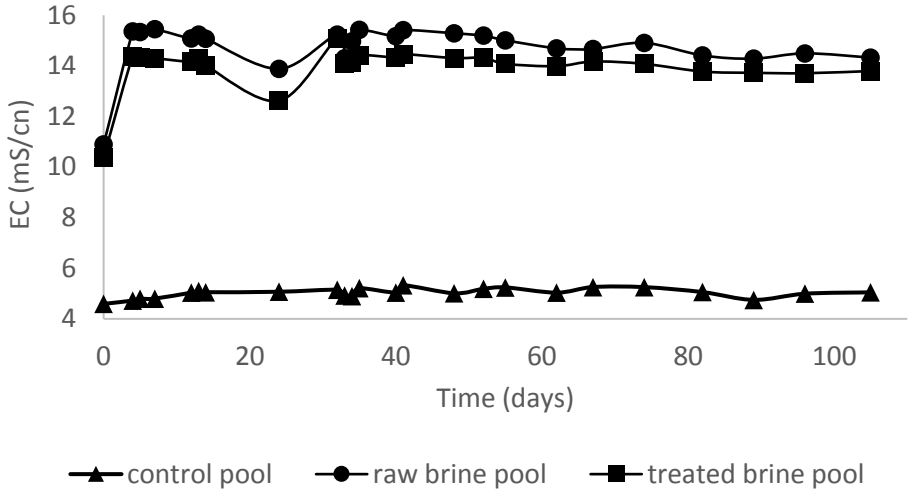
**איור 3.12.** הצטברות אבנית ע"ג אביזרים שונים במיכלי הרכז הגולמי. מימין: צינור אוויר סתום (שבקצהו משקולת ואזיקון), במרכז: לוח אבנית שהתגבש ע"ג דופן המיכל, משמאל: צינור יציאת מים ("2) סתום.

**חמצן**. איור 3.13 מציג את ריכוזי החמצן במיכלי הגידול לאורך הניסוי. ניתן לראות שריכוזי החמצן היו גבוהים לאורך הניסוי, כאשר במי הרכז הגולמי והמרוכך, ריכוזי החמצן היו גבוהים יותר בכ- 2 מג"ל מאשר במיכלי הביקורת. המסיסות של חמצן יורדת עם העליה במליחות, לכן לא סביר שהדבר נובע מהמליחות הגבוה של הרכז ביחס לתמלחת. הסיבה ככל הנראה קשורה לריכוזי החמצן במקור המים.



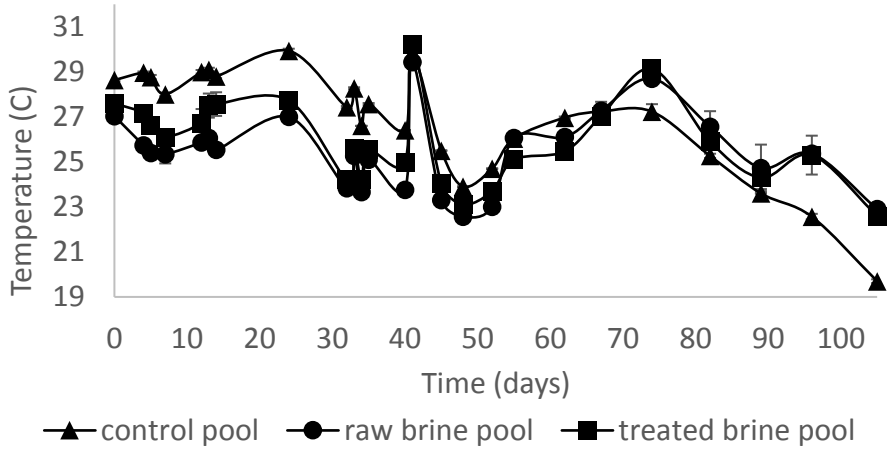

**איור 3.13.** ריכוזי החמצן במיכלי גידול הדגים לאורך הניסוי

**מוליכות.** איור 3.14 מציג את המוליכות החשמלית במיכלי גידול הדגים לאורך הניסוי. ניתן לראות שהמוליכות במיכלי הדגים המוזנים ברכז גולמי ומרוכך גבוהה משמעותית לעומת מיכלי הביקורת, כצפוי.



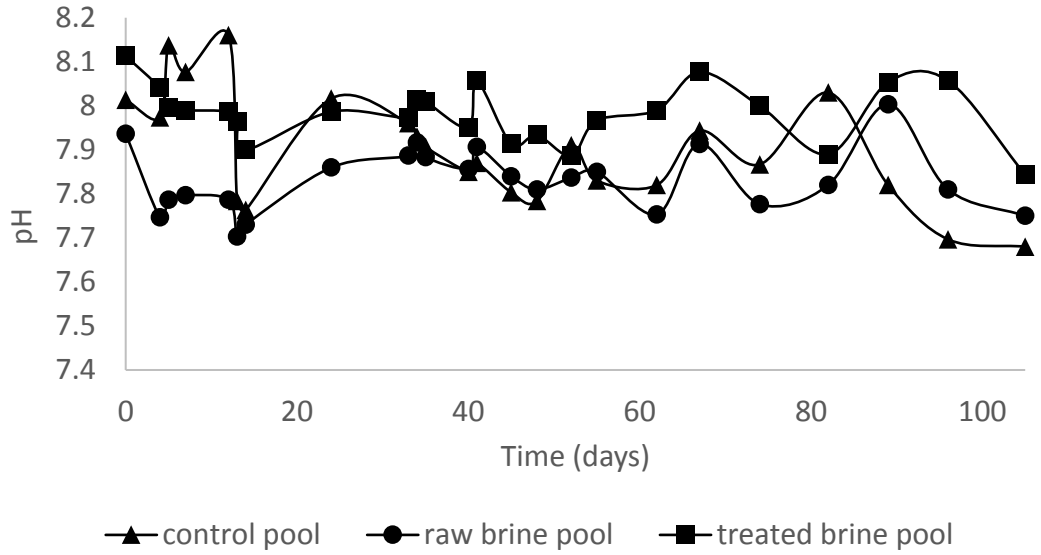

**איור 3.14.** המוליכות החשמלית במיכלי גידול הדגים לאורך הניסוי

**טמפרטורה.** איור 3.15 מציג את הטמפרטורה במיכלי גידול הדגים לאורך הניסוי. ניתן לראות שעד סוף ספטמבר (יום 60), הטמפרטורה במיכלי הביקורת היתה גבוהה במעלה על שתי מעלות מהטמפ' במיכלים שהוזנו במי רכז. מגמה זו התהפכה באוקטובר, כאשר בסוף הניסוי (14.11.19) כבר נמדדה טמפ' במיכלים המוזנים ברכז הגבוהה ב- 5 מעלות מהטמפ' של מי הביקורת. ממצא זה מעיד על עדיפות בניצול מי הרכז לצורך גידול דגים בתקופת החורף.



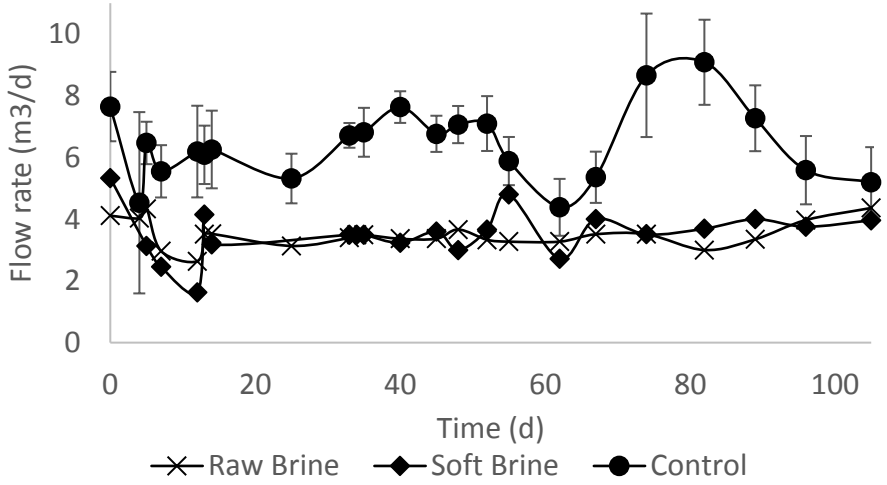

**איור 3.15.** הטמפרטורה במיכלי גידול הדגים לאורך הניסוי

**pH**. באיור 3.16 מוצגים ערכי ה pH במיכלי גידול הדגים לאורך הניסוי. ניתן לראות כי ערכי ה pH נעו בין 7.7 ל- 8.1 לאורך הניסוי ללא הבדלים משמעותיים בין סוגי המים השונים.



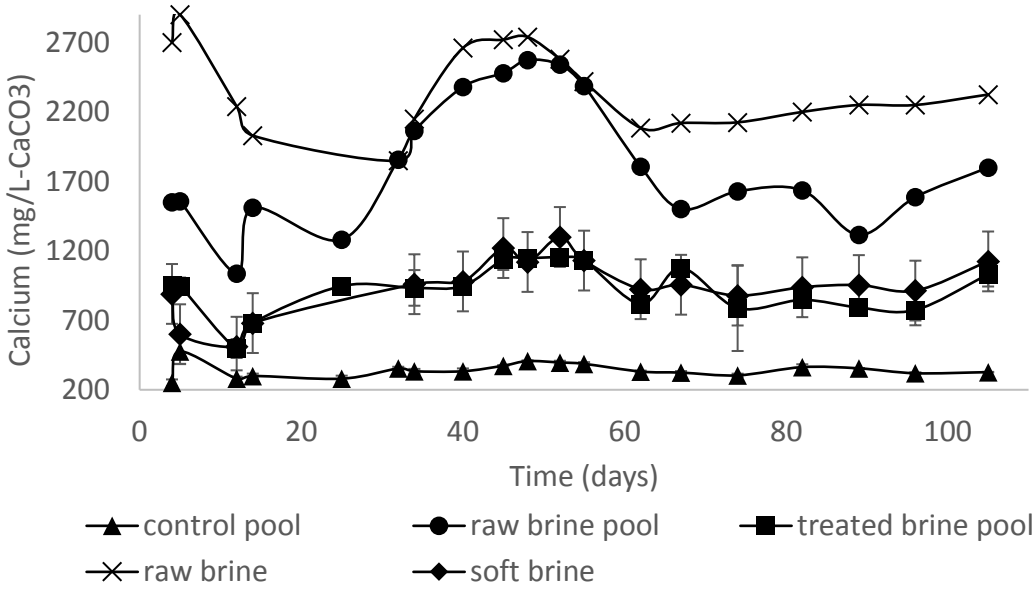

**איור 3.16.** ה pH במיכלי גידול הדגים לאורך הניסוי

**ספיקות.** איור 3.17 מציג את הספיקות במיכלי גידול הדגים לאורך הניסוי, כאשר הספיקות במיכלי הרכז חושבו ע"י חלוקת ספיקת הרכז בכל טיפול בצורה שווה בשלושת המיכלים. ניתן לראות כי הספיקות במיכלי הרכז הגולמי והמטופל היו דומות ועמדו על כ- 3.5 – 3.8 מ"ק ליום. הספיקות במיכלי הביקורת היו בערך כפולות מבמיכלי הרכז וזאת ע"מ לקבל איכות מים מיטבית.



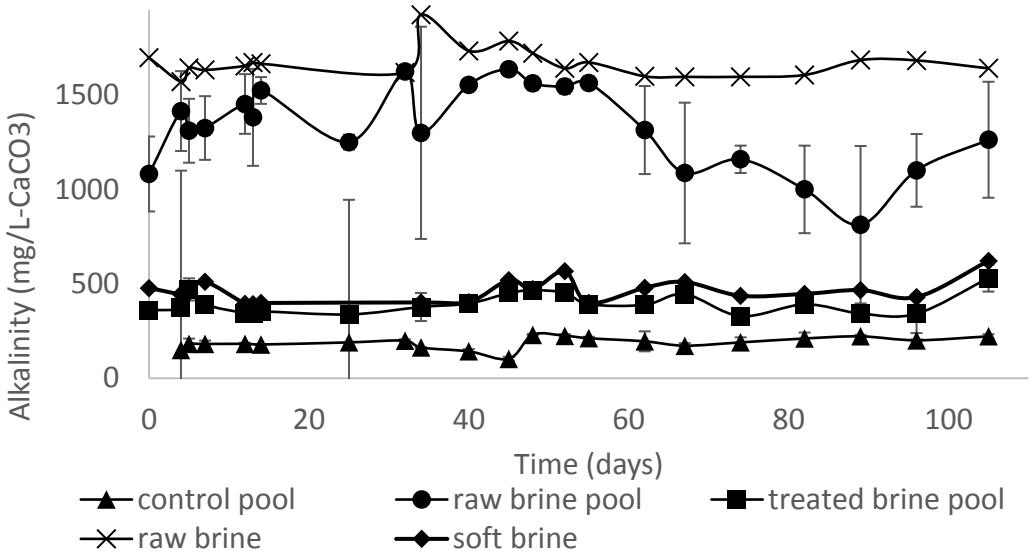

**איור 3.17.** הספיקות במיכלי גידול הדגים לאורך הניסוי

**סידן.** באיור 3.18 מוצגים ריכוזי הסידן במיכלי גידול הדגים וכן ברכז הגולמי והמרוכך לאורך הניסוי. ריכוזי הסידן הנמוכים ביותר נמדדו במיכלי הביקורת עם ערכים קבועים לאורך הניסוי של כ 330 מג"ל כק"ק. ריכוזי הסידן במיכלי הרכז המטופל היו זהים כמעט לריכוזי הסידן ביציאה ממתקן הריכוך, דבר המעיד על כך שלא התרחש כמעט שיקוע של סידן במיכלי גידול הדגים. יש לציין שנצפתה הצטברות איטית של סידן במיכל חלוקת מי הרכז המרוככים על גבי משטחים טבולים כגון דפנות ומשאבה. ריכוזי הסידן בבריכות הרכז הגולמי היו לרוב נמוכים משמעותית (ב- 0.2 – 0.6 גרם לליטר כק"ק) מהריכוזים ברכז הגולמי, דבר המעיד על שיקוע של סידן שהתרחש במיכלי הגידול. ממצא זה תואם את התצפית הויזואלית של הצטברות אבנית על פני משטחים שונים במיכלי הדגים (איור 3.12). ניכר שהשיקוע במיכלים הללו לא היה קבוע בזמן, ויתכן שהדבר נובע מסתימת צנרת האוורור שגרמה להקטנת ספיקת האוויר במיכלי הגידול. ניתן גם לראות שלמרות שיקוע הסידן בבריכות שהוזנו ברכז הגולמי, ריכוזי הסידן נשארו גבוהים יחסית לרכז המרוכך, דבר המעיד על הרחקה חלקית של הסידן. דבר זה הנו צפוי, מאחר וזמני השהיה וספיקות האוויר במיכלי הגידול היו נמוכים משמעותית ביחס לראקטור הריכוך.



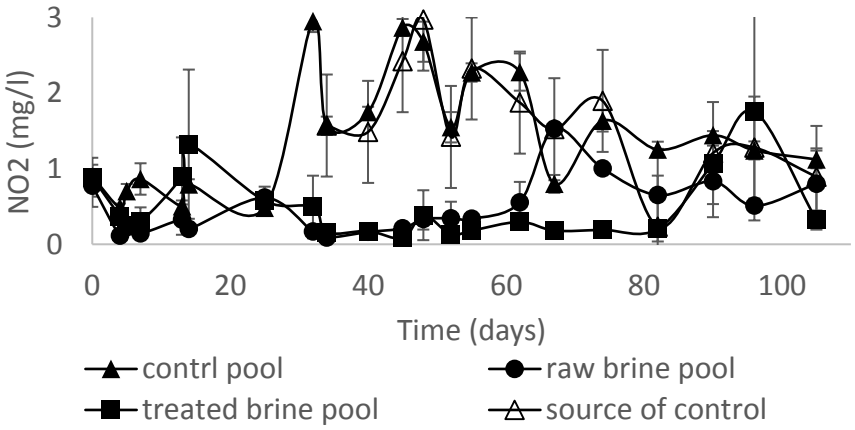

**איור 3.18.** ריכוזי הסידן במיכלי גידול הדגים וכן ברכז הגולמי והמרוכך לאורך הניסוי

**אלקליניות.** באיור 3.19 מוצגים ריכוזי האלקליניות במיכלי גידול הדגים וכן ברכז הגולמי והמרוכך לאורך הניסוי. ניתן לראות שיש התאמה בין ריכוזי הסידן (איור 3.18) לריכוזי האלקליניות כצפוי.

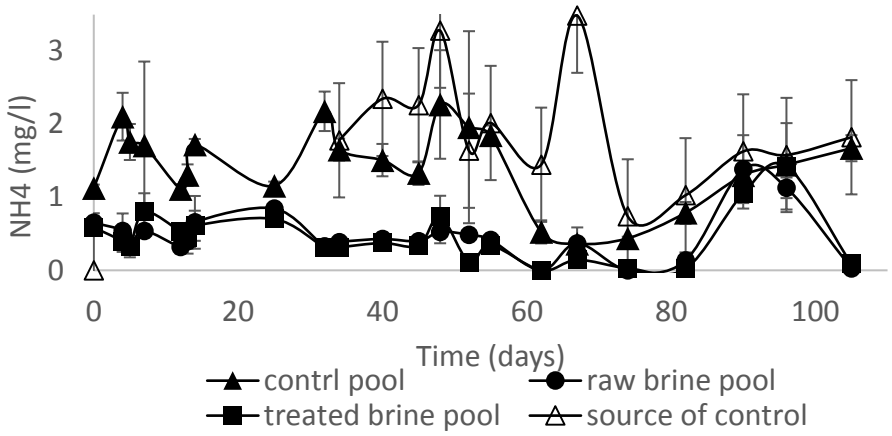



**איור 3.19.** ריכוזי האלקליניות במיכלי גידול הדגים וכן ברכז הגולמי והמרוכך לאורך הניסוי

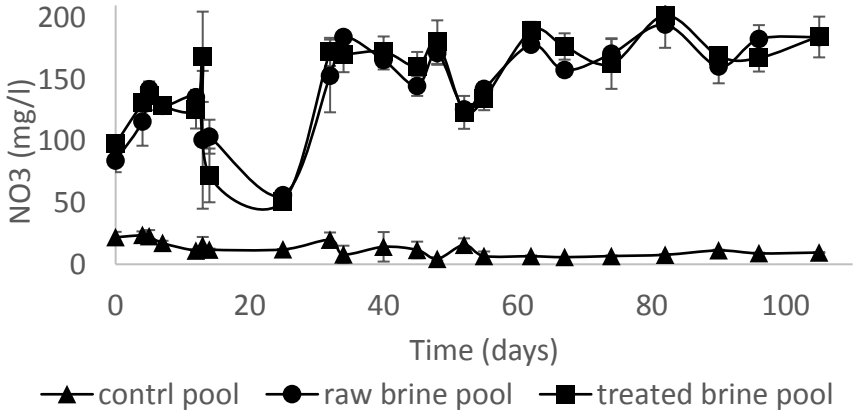
**תרכובות חנקן**. באיורים 3.20, 3.21 ו- 3.22 מוצגים ריכוזי הניטריט, האמוניום והניטראט, בהתאמה.




**איור 3.20.** ריכוזי הניטריט במיכלי גידול הדגים לאורך הניסוי




**איור 3.21.** ריכוזי האמוניום במיכלי גידול הדגים לאורך הניסוי



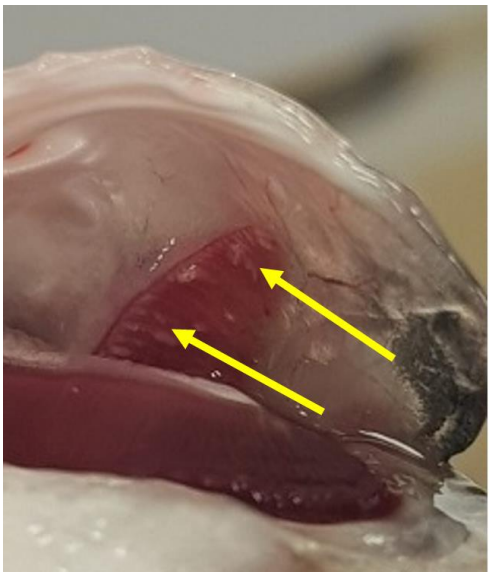

**איור 3.22.** ריכוזי הניטראט במיכלי גידול הדגים לאורך הניסוי

מאיורים 3.20 – 3.22 ניתן לראות כי ריכוזי הניטריט והאמוניום היו בד"כ גבוהים במיכל הביקורת ונמוכים במיכלי הרכז. הריכוזים הגבוהים של תרכובות אלו במי הביקורת נבעו מריכוזים גבוהים במי המקור (בריכת דגים פעילה של כפר מסריק). ריכוזי הניטראט במי בריכות הביקורת היו נמוכים, כצפוי ובבריכות שהוזנו ברכז גולמי ומרוכך, הריכוזים היו גבוהים והגיעו לכ- 180 מג"ל ניטראט, כתוצאה מהריכוזים הגבוהים ברכז הגולמי.

### 3.4 ממצאים פתולוגיים

בבדיקה פתולוגית שהתבצעה במעבדה לבריאות הדג בניר דוד בסוף הניסוי נמצא כי הדגים בכל המיכלים היו יפים וחזקים ללא ממצאים פתולוגיים למעט היפרפלאזיה ו controcestus בזימים ברמה נמוכה או נמוכה מאוד וכן Melano – Macrophage centers ברמה נמוכה

בטחול. בבריכות שהוזנו ברכז גולמי נצפה שיקוע של סידן מתחת למכסה הזימים, המוצג באיור 3.23.



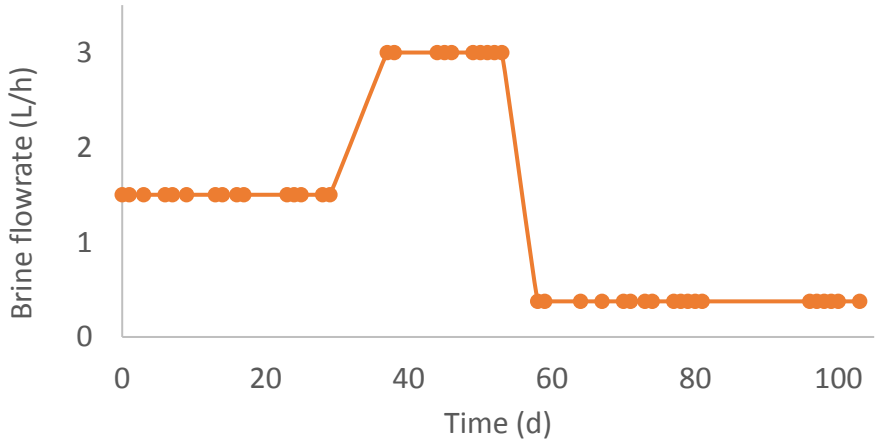
דג עם שיקוע סידן מתחת למכסה הזימים

דג ללא שיקוע סידן מתחת למכסה הזימים

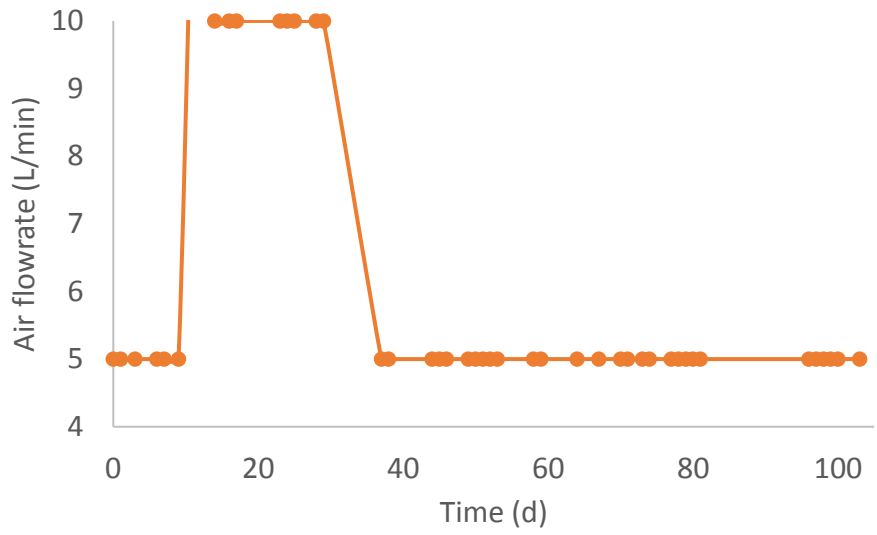
**איור 3.23.** צילום החלק הפנימי של מכסה הזימים בדגים שגודלו ברכז גולמי (ימין) וברכז מרוכך (שמאל) בסוף הניסוי

### 3.5. ביצועי ראקטור ריכוך רציף מעבדתי

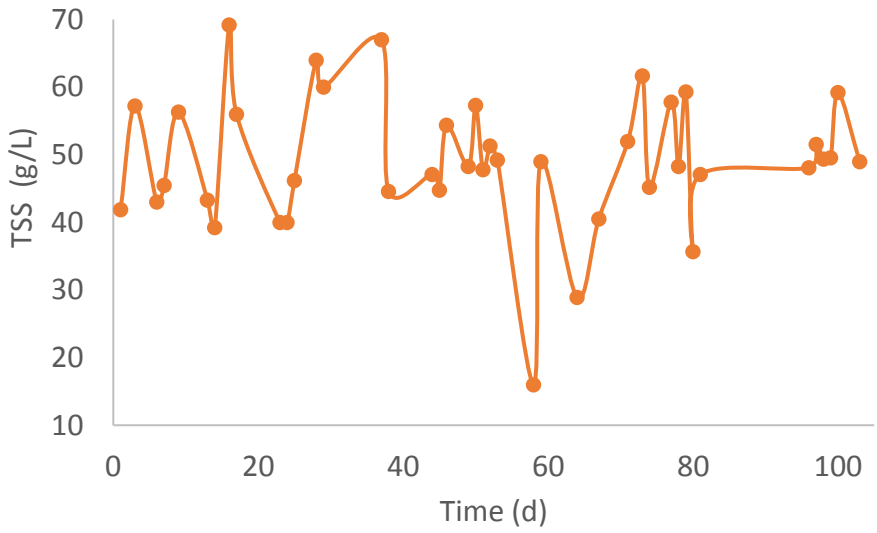
הראקטור המעבדתי הרציף נבנה במטרה לבחון את השפעת קצבי אוורור וריכוז גרעיני הגיבוש על הרחקת סידן רציפה. איורים 3.24 – 3.26 מציגים את ערכי הפרמטרים התפעוליים לאורך הזמן: ספיקת תמלחת, ספיקת אוויר וריכוז חלקיקים מרחפים.




**איור 3.24.** ספיקת הרכז הנכנס לראקטור הרציף




**איור 3.25.** ספיקת האוורור בראקטור הרציף

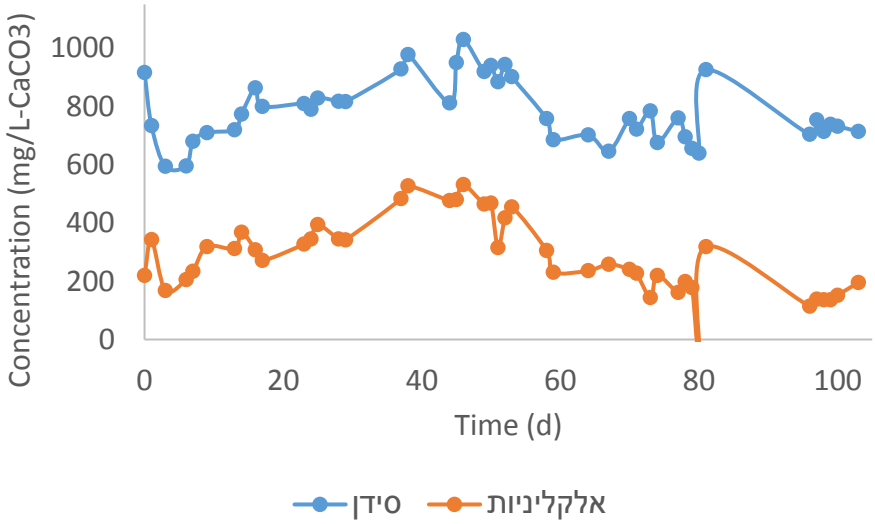



**איור 3.26.** ריכוז החלקיקים המרחפים בראקטור הרציף

התנאים התפעוליים היו חלק מסדרה גדולה יותר ניסויים שמטרתם למצוא את הפרמטרים התפעוליים המיטביים. כפי שניתן לראות באיור 3.26 ריכוז החלקיקים היה גבוה יחסית לניסויים המנתיים ונע באזור 40 – 60 גרם לליטר לאורך הניסוי. המשמעות של ריכוז חלקיקים גבוה הנה זמן שהיית מוצקים ארוך יחסית בראקטור. באיור 3.24 ניתן לראות שיושמו שלוש ספיקות כניסה לראקטור. ככל שהספיקה גבוהה יותר, זמן השהיה ההידראולי קצר יותר, והרחקת המוצקים צפויה להיות נמוכה יותר. באיור 3.25 ניתן לראות שיושמו שתי ספיקות אוויר של 150 ושל 300 מ"ק אוויר למ"ק ראקטור לשעה. ספיקות אלו גבוהות

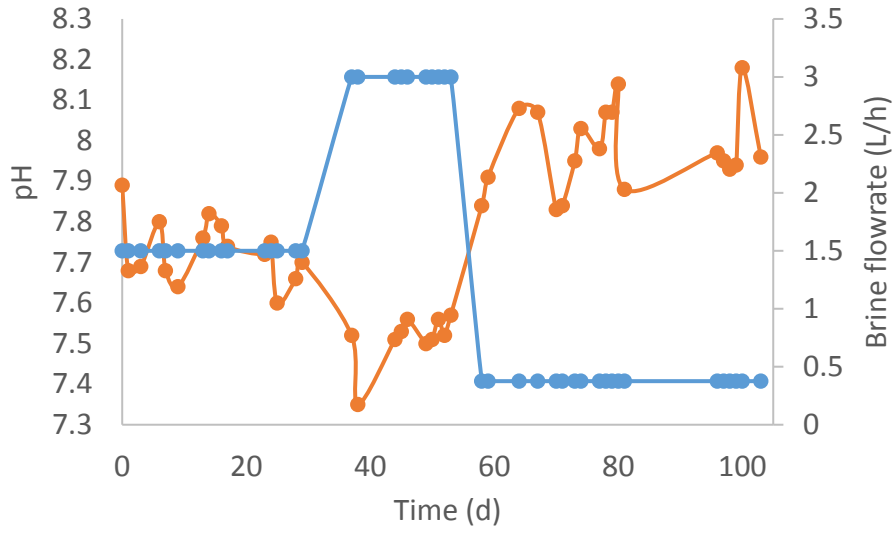
משמעותית מספיקות האוויר בניסויים המנתיים (עד 62 מ"ק אוויר למ"ק ראקטור לשעה) ומאלו שיושמו בכפר מסריק (סביב 14 מ"ק אוויר למ"ק ראקטור לשעה). ספיקות האוויר הגבוהות נועדו להביא לקצבי הרחקה מקסימליים.

באיור 3.27 ניתן לראות את ריכוזי הסידן והאלקליניות ביציאה מראקטור הריכוך הרציף. ניתן לראות שכצפוי ישנה התאמה בין מגמות ההשתנות של שני הפרמטרים. כמו כן, ניתן לראות שאין שינויים גדולים בריכוזים לאורך הניסוי, דבר המצביע על קצבי הרחקה פחות או יותר זהים של הסידן תחת תנאי תפעול שונים. ניתן לראות עליה מסוימת בריכוזי הסידן והאלקליניות בין יום 30 ל- 60, התואמת לעליה בספיקה הנכנסת ולהקטנת זמן השהיה ההידראולי. העובדה שלאוורור לא היתה כל השפעה על קצבי הרחקת הסידן נובעת ככל הנראה מכך שמעל ערך מסוים, ספיקת האוויר כבר לא משפיעה על קצבי התגובה. בניסויי המשך יעשה ניסיון למצוא את הערך הזה. מעניין לציין שריכוזי הסידן והאלקליניות שנמדדו בניסויים המנתיים המיטביים היו כ- 550 ו- 140 מג"ל כק"ק, בהתאמה. הערכים שנמדדו בראקטור הרציף היו גבוהים יותר משמעותית.

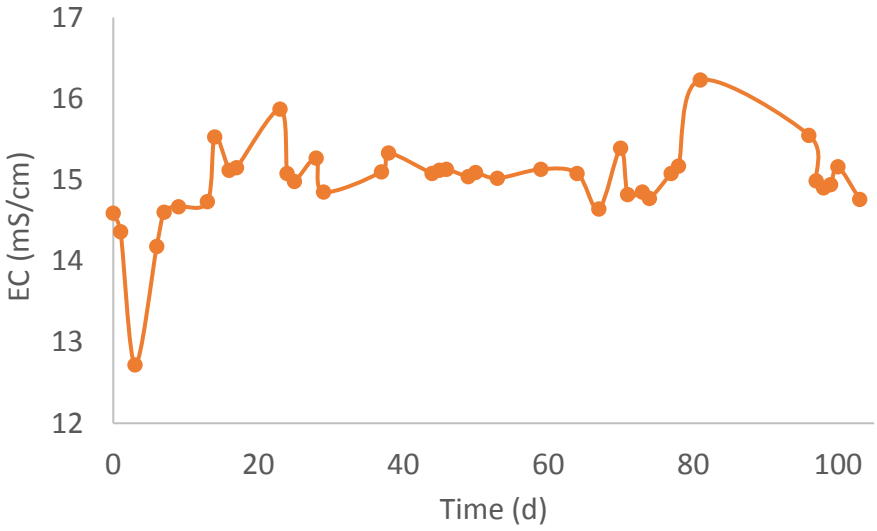



**איור 3.27.** ריכוז הסידן והאלקליניות בראקטור הרציף

איורים 3.28 ו- 3.29 מציגים את ה pH ואת ערכי המוליכות החשמלית בראקטור לאורך הניסוי, בהתאמה. באיור 3.28 ניתן לראות שערכי ה pH שנמדדו השתנו בצורה הופכית לספיקת הרכז. בניסויים המנתיים ה pH הסופי הגיע לכ- 8.5, וניתן לשער שככל שספיקת הרכז יורדת, גדלים זמני השהיה ההידראולים והמערכת מתקרבת למערכת מנתית. ערכי המוליכות החשמלית לא השתנו כמעט לאורך הניסוי, דבר התואם את ריכוזי הסידן שנמדדו.




**איור 3.28.** ערכי ה pH בראקטור הרציף




**איור 3.29.** ערכי המוליכות החשמלית בראקטור הרציף

## 4. סיכום

בניסוי שנערך בכפר מסריק הושווה גידול דגי לברק ברכז גולמי וברכז מטופל במשך כשלושה וחצי חודשים. למעט שני אירועי תמותה שהתרחשו במיכלי הרכז הגולמי והמרוכך שנבעו ככל הנראה ממחלה, השרידה היתה גבוהה מאוד בכל הטיפולים, כאשר בביקורת השרידה היתה 100%, ברכז הגולמית 99.3% וברכז המרוכך 92%. קצבי הגידול היו גבוהים יותר ב- 11% וב- 22% בבריכות שהוזנו ברכז מטופל, לעומת בבריכות שהוזנו ברכז הגולמי ובמי ביקורת, בהתאמה. ניתן להסיק שדגי לברק שרדו וגדלו בצורה טובה גם ברכז גולמי וגם ברכז מרוכך של מתקן ההתפלה בכפר מסריק, תחת תנאי הניסוי. הדו"ח הפתולוגי אף הוא הראה בריאות גבוהה של הדגים בכל סוגי המים, אם כי נצפה שיקוע סידן תחת מכסה זימים במיכלים שהוזנו ברכז גולמי. בבריכות שהוזנו ברכז גולמי היה שיקוע אבנית משמעותי ומהיר שגרם לסתימות תכופות של צנרת וצורך בניקוי תכוף. דבר זה צפוי לגרום לקושי תפעולי במתקני גידול אינטנסיביים ברכז גולמי. בעיה נוספת שעשויה להתרחש קשורה לריכוזי הניטראט הגבוהים שברכז. מלבד בעיות אלו, איכות המים בבריכות הדגים היתה בס"ה טובה, למעט ריכוזי אמוניה וניטריט גבוהים בבריכות הביקורת שנבעו ממי המקור.

מתקן הריכוך הרחיק כ- 1.2 גרם סידן כק"ק לליטר רכז (כ- 57% הרחקה). התגלה קושי טכני בערבול המוצקים וסחרורם עקב שיקוע סידן על גבי המשאבות ובצנרת. כתוצאה מכך הצטברו משקעי סידן בראקטור ובצנרת וריכוז החלקיקים המרחפים עמד על 0.6 גרם לליטר בלבד. הגדלת ריכוז החלקיקים המרחפים ל 12 גרם לליטר צפויה להקטין את העלויות בערך פי 2, ולכן יש חשיבות גדולה למצוא פתרון טכני לבעית הערבול וסחרור המוצקים.

ניסויי ריכוך ראשוניים בראקטור מעבדתי רציף הראו הרחקת סידן פחות טובה מזו שהתקבלה בניסויים המנתיים המיטביים. בימים אלו נערכים ניסוי זה נמשך במטרה לשפר את הביצועים.