

החוג ללימודי הסביבה
ביה"ס לסביבה ולמדעי כדור
הארץ ע"ש פורטר
הפקולטה למדעים מדויקים
ע"ש ריימונד וברלי סאקלר



אוניברסיטת תל אביב

ביה"ס לסביבה ומדעי כדור הארץ ע"ש פורטר - המעבדה לביו-הנדסה סביבתית

בשיתוף:

החוג לגאוגרפיה וסביבת האדם - המעבדה לחקר איכות האוויר אונ' ת"א

המחלקה למדעים גאו-ימיים, אוניברסיטת חיפה

סימולציה של השפעת תנאים סביבתיים על גידול של מאקרו-אצה מזון חסנית (sp.)

(*Ulva*) לשימושי מזון וביו-אנרגיה

חיבור המוגש כעבודת גמר לתואר "מוסמך אוניברסיטה" M.Sc

בלימודי סביבה

נועם רוסינסקי

בהנחיית:

ד"ר אלכס גולברג, בית הספר ללימודי סביבה פורטר, אוניברסיטת תל אביב

ד"ר אלכסנדרה צ'ודנובסקי, המעבדה לחקר איכות האוויר, החוג לגאוגרפיה וסביבת האדם, אוניברסיטת תל-

אביב

ד"ר יואב להן, המחלקה למדעים גאו-ימיים, אוניברסיטת חיפה

חתימות המנחים:

מאי, 2019

תודות

אני מודה לאלכס גולברג, על כך שקיבל אותי למעבדה בשלביה המוקדמים, ושהנחה אותי בתזה זו כמנחה עיקרי, כמו כן גם לד"ר אלכסנדרה צ'ודנובסקי ולד"ר יואב ליהן על הנחייתם בעריכת מחקר זה.

תודה למאיה, אשתי היקרה מכול על התמיכה וההבנה לאורך לימודיי לתואר זה.

תודות למרכז מנה לבטיחות ולביטחון תזונתי על התמיכה והמעטפת, למשפחתה של אפרת פומפס ז"ל, ולבית הספר פורטר על פרס ההצטיינות שהחליטו להעניק לי.

תודותיי גם לחיא"ל עבור שיתוף הנתונים ולחברת פלורה פוטוניקה בע"מ על הסיוע הטכני.

LIST OF ACRONYMS:

ASW-Artificial Sea Water

AU-artificial upwelling

CMPBR- closed macro algae photo bioreactor system

DW-dry weight (gram biomass)

DM- dry matter

DGR- Daily growth rate (%)

DO-Dissolved oxygen (mg/L)

FW-fresh weight (gram biomass)

CHNS- carbon hydrogen nitrogen sulfur

HNS-high nutrient supply

LNS-low nutrient supply

IOLR-Israel oceanographic and limnological research

PAM- Pulse Amplitude Modulation

PBR-photo bioreactor

QY- quantum yield (Φ)

TAN-Total Ammonia nitrogen

TEA- techno economic analysis

WW-wet weight (biomass)

תוכן עניינים

I.....	תקציר
III.....	רשימת האיורים
IV.....	רשימת הטבלאות
V.....	רשימת הנספחים
1.....	1. מבוא
2.....	1.1 רקע תיאורטי של מאקרו-אצות
2.....	1.2 פילוגנטיקה וסיסטמטיקה של אצת ה- <i>Ulva</i>
3.....	1.3 פיזיולוגיה ומחזור החיים של ה- <i>Ulva</i>
4.....	1.4 ביו-ריפיינרי (Biorefinery)
5.....	1.4.1 ביו-ריפיינרי מאצות
5.....	1.4.2 דוגמאות ליישום תהליך הביו-ריפיינרי
6.....	1.4.3 אקוסיסטמה ימית וגידול אצות לביו-ריפיינרי ימי
7.....	1.4.4 פערים ואתגרים בגידול ויישום ביו-ריפיינרי
8.....	2. סקירת ספרות
8.....	2.1 תפקיד האצות בסביבה ובמאזן הפחמן הגלובלי
8.....	2.2 יישומים של אצות בתעשייה
8.....	2.2.1 יישומים בתחום טיהור המים
9.....	2.2.2 יישומים בתחום המזון, לאדם ולבעלי חיים
10.....	2.2.3 האצה כמקור מזון לבעלי חיים
10.....	2.2.4 שיטות קיימות להפקות ביו-דלקים מאצת ה- <i>Ulva</i>
11.....	2.2.5 סיכום יישומים לאצת ה- <i>Ulva</i>
11.....	2.3 תנאי גידול בים תיכון
11.....	2.3.1 נוטריינטים
12.....	2.3.2 פרמטרים אביוטיים עיקריים בגידול מאקרו-אצה <i>Ulva</i>
13.....	2.3.3 אסימילציה TAN והרכב
14.....	2.3.4 זרחן
14.....	2.3.5 פחמן
14.....	2.3.6 אור – עוצמה וספקטרום
14.....	2.3.7 טמפרטורה
14.....	2.3.8 מליחות
14.....	2.3.9 צפיפות
16.....	2.3.10 משטרי זרימה ואוורור
16.....	2.3.11 פלורה מיקרוביאלית
16.....	2.4 פוטוסינתזה במאקרו-אצה והערכת " quantum yield "
17.....	2.5 שיטות לגידול אצות
17.....	2.5.1 גידול בים - קרוב לחוף, ורחוק מהחוף
17.....	2.5.2 גידול בבריכות ומכלים ביבשה

18.....	2.5.3 פוטו-ביו-ריאקטור לגידול מיקרו ומאקרו-אצות על פי מחקרים קודמים
19.....	2.6 סיכום סקירת ספרות – פערי ידע
19.....	2.7 הפתרון המוצע
21.....	3. הליך המחקר
21.....	3.1 מטרות המחקר
21.....	3.2 שאלת המחקר וההשערה
21.....	3.2.1 שאלת המחקר
21.....	3.2.2 השערת המחקר
21.....	3.3 שיטות וחומרים
21.....	3.4 פוטו-ביו-ריאקטור – מערכת לגידול מאקרו-אצות בסימולציות
22.....	3.4.1 תאורה בפוטו-ביו ריאקטור
22.....	3.4.2 הערכת הקרינה הממוצעת בחודשים שונים בחופי ישראל
24.....	3.4.3 פירוט מדידות תאורה
24.....	3.4.4 תאי גידול
25.....	3.4.5 תנאים פיזיאלוגיים
25.....	3.5 תיאור מערך הניסויים במחקר
25.....	3.5.1 תקופת אקלום
26.....	3.5.2 מערך הסימולציה
27.....	3.5.3 תנאי הניסויים
30.....	3.6 סיכום מטודולוגיה
31.....	3.7 מדידות בניסויים
31.....	3.7.1 מדידות קצב גידול
31.....	3.7.2 מדידות תאורה
32.....	3.7.3 ייבוש ושקילות ביומסה
32.....	3.7.4 מדידות פוטוסינתזה
33.....	3.7.5 אנליזת מי ים
33.....	3.7.6 חומרים ליצירת המדיום
34.....	3.7.7 מליחות וטמפרטורה
34.....	3.7.8 פעפוע אוויר
34.....	3.7.9 מעקב הטמפרטורה בריאקטור
34.....	3.7.10 אנליזה אלמנטרית
35.....	3.7.11 סטטיסטיקה וניתוח נתונים
35.....	3.7.12 ניתוח תוצאות קצבי גדילה (DGR)
35.....	3.7.13 שיטות ניתוח מדידות QY ממכשיר PAM 2000
35.....	3.7.14 בחינת הנחות
35.....	3.7.15 סוגי ניתוחים לתוצאות אנליזה CHNS
36.....	4. תוצאות
36.....	4.1 תמונת חתך של מערכת מלאכותית פוטו-ביו ריאקטור
37.....	4.2 מבט-על – תאי גידול האצות

37.....	4.4 הדמיה של מדידת הספקטרום
38.....	4.5 ניתוח תוצאות אפיון ספקטרום
39.....	4.6 הדמיה ותיעוד מדידות ספקטרומטריות
40.....	4.7 אפיון תוצאות ספקטרו-מטר
40.....	4.8 קרינה פוטו-אקטיבית
42.....	4.9 זרימת מים בריאקטור
43.....	4.10 ריכוז הנוטרינטים במלח
44.....	4.11 ריכוזי חנקן וזרחן בסימולציות לעונות שונות
45.....	4.12 אפיון תוצאות אנליזה אלמנטרית של ביומסת אצות
53.....	4.14 תוצאות גידול ביומסה
55.....	4.15 שינויים פיזיולוגיים של האצות
57.....	4.16 יעילות פוטו-סינטטית
60.....	5. דיון
60.....	5.1 פיתוח ריאקטור
60.....	5.2 בחינת הריאקטור ככלי לביצוע סימולציות חורף אביב וקיץ
61.....	5.3 השוואת תוצאות הגדילה של אצת <i>Ulva</i>
62.....	5.4 השוואת סימולציה של עונת האביב לתוצאות מחוף רידינג בתל-אביב
62.....	5.5 הערכת CHNS ואסימילציה
62.....	5.5.1 יחסי P/N
62.....	5.5.2 ערכי חנקן באצות לאחר ביצוע סימולציות
63.....	5.5.3 ערכי פחמן ויחסי C/N
64.....	5.5.4 ערכי גופרית ומימן
64.....	5.6 פוטוסינתזה באצת <i>Ulva</i>
65.....	5.7 העלאה מלאכותית של מי ים מהעומק
67.....	6. מגבלות המחקר והמלצות למחקר הבא
68.....	7. סיכום ומסקנות
69.....	ביבליוגרפיה
82.....	נספחים
I.....	Abstract

תקציר

מדינת ישראל היא מדינה צפופה המעודדת תהליך ארוך טווח של גידול אוכלוסייה, ומקיימת בעת ובעונה אחת משק יציב שמפיק תוצר מקומי צומח בקצב העולה על ריבוי האוכלוסייה ובשל זאת, הביקושים למזון, וליבוא נפט לצורכי תחבורה והדרישה לשטחי מגורים ומקומות עבודה עולים בעקביות. לכן על מנת למלא דרישות אלו, וכדי לשמור על הפיתוח של המדינה, מומלץ למצוא פתרונות חדשניים העשויים להימצא מחוץ לאזורי החקלאות המסורתיים. פוטנציאל השטח הימי של מדינת ישראל לצורך חקלאות ימית של אצות ים יכול להוביל להפחתת הלחצים על הקרקע היבשתית. שטחה של מדינת ישראל במים הכלכליים (BEZ-Exclusive Economic Zone), הגדול ב-24%¹ בהשוואה לשטחה היבשתי ולא מנותב היום לגידול ביומסה.

לחלופה המוצעת-גידול מאקרו אצות בים קיימים אתגרים רבים ביישום. הראשון הוא שגידול אצות וניהול מחקר רציף ראשוני בלב ים הם משימות קשות לביצוע, הן בגלל האספקטים הלוגיסטיים המגוונים המאפיינים אותן, הן בגלל שהן מצריכות שימוש בתשתיות רבות שעדיין לא קיימות. בנוסף עלויות כספיות גבוהות לביצוע מחקר בים פתוח בשלב זה המהוות חסם משמעותי. כיום, על בסיס נתוני הניטור השונים הקיימים, לא ידוע האם ניתן לגדל מאקרו-אצות רחוק מהחוף? היכן, ובאיזו עונה? וכמו כן, האם התנאים הסביבתיים (פיזיקליים וביו-כימיים) הקיימים מאפשרים קצב גידול ביומסה גבוה בים התיכון? בישראל, אתגר נוסף שעליו יש להתגבר הוא הריכוזים הנמוכים משמעותית של המאקרו-נוטריינטים בים התיכון. סיבות אלו ואחרות הופכות את השטח הימי למערכת מורכבת ולאזור בעל פוטנציאל מגוון לקידום כלכלה כחולה, כאלו שקשה ומורכב לחקור אותם לצורך בחינת שימוש עתידי בשטחי הים על מנת לספק מקור תשתית בר-קיימא לגידול מאקרו-אצות.

פתרון שעשוי להיות רלוונטי בשלב זה של התפתחות הטכנולוגיה הוא ביצוע סימולציות במעבדה שידמו את החלק של התנאים של ים פתוח. אחד המטרות העיקריות של המחקר הזה היה פתוח מערכת מעבדתית, photobioreactor, שתאפשר סימולציות מסוימות של תנאי הים עבור גידול של אצת ים ירוקה מסוג *Ulva*, נפוצה מאוד בחופי ישראל. המערכת שפותחה אפשרה לחקור את השפעת התאורה ונוטריינטים, ברמות הרלוונטיות לעונות שונות בים תיכון באזור ישראל על קצבי גידול יומי (DGR), הרכב ביוכימי (CHNS), ופרמטרים פיסיולוגיים נוספים כגון מעקב אחר נראות הטאלוסים ובדיקת היעילות הפוטו סינטטית. בניסויים אלה שיערנו כי שבעתיד נוכל להעלות מי-עומק עשירים בנוטריינטים בצורה מלאכותית לפני הים במטרה לנצל את ריכוזי המאקרו-נוטריינטים הגבוהים שבעומק לטובת גידול מיטבי של האצות, ולהפחית עלויות דישון.

¹ פוטנציאל השטח הימי עפ"י הערכה של אגף אוצרות טבע, משרד האנרגיה.

כדי לענות על שאלות המחקר בוצעו כתשע סימולציות בשימוש הפוטו ביו-ריאקטור שפותח, שכל אחת נמשכה שלושה ימים. מסימולציות אלו הושגו קצבי גדילה (DGR) בערכים מקסימליים לעונת הקיץ שעמדו על 34 ± 24 (average \pm SD) בשימוש דשן בריכוזים שנמצאו בעומק 500 מטרים: חנקן וזרחן של 5.8, 0.2 $\mu\text{mol/l}$) בהתאמה לאחר גידול בעוצמת תאורה של $259 \text{ PAR } \mu\text{mol of photons m}^{-2} \text{ s}^{-1}$. קצבי גידול מינימליים שנמדדו היו 21 ± 7 לעונת החורף בריכוזי נוטרינטים שנמדדו בעומק 460 מטרים: חנקן וזרחן של 6.5, 0.2 $\mu\text{mol/l}$) בהתאמה לאחר גידול בעוצמת תאורה של $112 \text{ PAR } \mu\text{mol of photons m}^{-2} \text{ s}^{-1}$. קצבי גידול של 26 ± 20 נמדדו לסימולציות של עונת האביב, בשימוש בריכוזי חנקן וזרחן של 16.4, 1.9 $\mu\text{mol/l}$) בהתאמה לאחר גידול בעוצמת תאורה של $259 \text{ PAR } \mu\text{mol of photons m}^{-2} \text{ s}^{-1}$. אנו משערים כי הטמפרטורה הגבוהה של מי הגידול השפיעה לטובה על קצב הגידול שנמדד בעונת הקיץ, בעוד שטמפרטורות נמוכות דוקא האטו את קצבי הגידול שנתקבלו לעונות החורף והאביב – שביניהם היה הבדל של 1.3 מעלות (לטובת עונת האביב), כאשר ייתכן שההבדלים ברמות התאורה השפיעו גם כן. לא נמצאה השפעה מובהקת של כל הפרמטרים השונים שנבדקו על היעילות הפוטו-סינטטית מסוג QY (quantum yield). הערכים המקסימליים של היעילות הפוטו סינטטית שהתקבלו עבור הפרמטרים השונים היו בטווחי ה-0.4. תכולת החלבון היחסית (% of DW) הייתה: 13.3 ± 0.9 , 11.8 ± 0.1 , 11.2 ± 1.7 , 8.6 ± 2.7 (average \pm SD) עם ערכי החציון: 13.3, 11.8, 10.8, 9.7 לסימולציות לעונות: אביב (קרוב לחוף), קיץ (רחוק מהחוף), חורף (רחוק מהחוף), חורף (רחוק מהחוף), ללא סירקולציה מים בתאי הגידול), בהתאמה. ריכוזי החנקן הפנימי שמצאנו (% of DW) היה: 2.3 ± 0.1 , 2.1 ± 0 , 2.0 ± 0.3 , 1.5 ± 0.4 (average \pm SD) עם ערכי החציון: 2.3, 2.1, 1.9, 1.7 לסימולציות עונות אביב, קיץ, חורף, חורף מיוחד, בהתאמה. אנו מעריכים שבכל התנאים שבחנו, ריכוזי החנקן לא היו גורם מגביל עבור הגידול (למעט הניסוי בו לא הייתה זרימת מים בראקטור). בסימולציה של אביב קצב הקליטה נמצא כיעילה ביותר, זאת מאחר שריכוזי החנקן ההתחלתי היה גבוה פי 15 לעומת החורף.

לסיכום, כדי לחקור כמה ביומסה ימית נוכל לקבל תיאורטית בגידול ימי "offshore" פיתחנו שיטה לגידול האצה במעבדה, בשילוב תנאי ים מסוימים עבור עונה מוגדרת, בדגש על נתוני נוטרינטים מגבילים, כגון חנקן כולל ופוספט, לפי הנתונים בעומקים שונים רחוק מהחוף. בעתיד, את מי-עומק עשירים בנוטרינטים, ניתן יהיה להעלות ע"י "artificial upwelling" ובכך להתגבר על אתגר דלילות ריכוזי הנוטרינטים במי השטח אשר הכרחיים לגידול, ולכך השפעה רבה ומגוונת. תוצאות של עבודה הזאת מציעות שיטה וכלים חדשים לביצוע הערכת הפוטנציאל השטח הימי עבור גידול ביומסה ליצור מזון, חומרים ודלקים.

רשימת האיורים

- איור 1: חלק מהעץ הטקסונומי של האצות והצמחים הירוקים. 3.....
- איור 2: יצע של האצה *Ulva* (צילום: נועם ר')..... 4.....
- איור 3: אבולוציה טמפורלית של ריכוזי חנקן וזרחן בים תיכון כפי שהוצעה על בספרות בשנת 2013. 12.....
- איור 4: הערכת ממוצע קרינה יומי עבור 3 חודשים. 23.....
- איור 5: תא גידול יחיד בריאקטור. 24.....
- איור 6: אתר לנתונים עבור ביצוע סימולציית תנאי אביב (חודש אפריל). 27.....
- איור 7: אזורי דיגום – סקר רקע 2013. 27.....
- איור 8: תיעוד מערך של ניסוי גידול. 29.....
- איור 9: תרשים זרימה במחקר. 30.....
- איור 10: יסודות נלווים להמסת מלח. 33.....
- איור 11: תמונות חתך של מערכת מלאכותית פוטו-ביו ריאקטור הכולל סרטוט. 36.....
- איור 12: מבט קרוב מעל תא הגידול כשאינו מואר עם 5 קולבות ומידותיו (צילום נועם ר'). 37.....
- איור 13: הדמיית ניסוי מדידת ספקטרום, וזווית הקריאה. 38.....
- איור 14: עקומי פליטה ספקטראליים למצבי הארה 31 או 83 W/m^2 . 39.....
- איור 15: הדמיה ותיעוד מדידות ספקטרו-מטריות (W/m^2) בתא הגידול. 40.....
- איור 16: אפיון תוצאות ספקטרומטר למצבי הארה 50%-ו-75%. 40.....
- איור 17: תוצאה למדידת קרינה פוטו-אקטיבית (PAR). 41.....
- איור 18: תיעוד מדידות קרינת "PAR" באמצעות סנסור כדורי ובזוויות אופייניות ואפשריות. 41.....
- איור 19: תוצאות שטף הקרינה שנמדד במיקום התאים. 42.....
- איור 20: קצב תחלופת מים בתאים (קולבות) במהלך הסימולציות. 43.....
- איור 21: הערכת תכולת מימן. 45.....
- איור 22: הערכת תכולת חנקן באצות. 47.....
- איור 23: הערכת תכולת חלבון. 48.....
- איור 24: הערכת תכולת פחמן. 50.....
- איור 25: הערכת תכולת גופרית. 51.....
- איור 26: גרף "box plots" התפלגות אחוזי הגדילה עבור סימולציות שונות. 53.....
- איור 27: ערכי יעילות פוטו סינטטית של תאלוסי *Ulva* עבור הסימולציות לעונות שונות. 58.....
- איור 28: משאבה להעלאת מי עומק להדגמה עבור גידול בים פתוח. 65.....

רשימת הטבלאות

- טבלה 1: השוואה בין ריכוזי מינרלים שונים באצות *Ulva lactuca*, *Gracilaria salicornia* וירקות שונים.....10
- טבלה 2: ריכוז נתונים של קצבי גדילה מעבודות שונות.....15
- טבלה מס' 3: חישוב קרינה לסימולציות.....23
- טבלה 4: פירוט התנאים האביוטיים במהלך הסימולציות השונות ב-PBR.....28
- טבלה 5: אורך שעות הארה וחשכה בפוטו-ביו ריאקטור בזמן סימולציות (כולל רמות תאורה).....28
- טבלה 6: מעקב פרמטרים בניסויים.....29
- טבלה 7: תוצאות מעקב טמפ' ממכשיר HOBO במהלך הסימולציות.....34
- טבלה 8: תוצאות ריכוזי דשנים ביחידות μM בהמסת מלח של חברת "Red Sea".....44
- טבלה 9: תוצאות ריכוזי דשנים ביחידות ppm בהמסת מלח של חברת "Red Sea".....44
- טבלה 10: ריכוזי חנקן וזרחן במים, והערכת חלבון באצה.....44
- טבלה 11: סטטיסטיקה תיאורית-הרכב מימון באצות.....46
- טבלה 12: ניתוח שונות (ANOVA)-הרכב מימן באצות.....46
- טבלה 13: סטטיסטיקה תיאורית – חנקן באצות.....47
- טבלה 14: ניתוח שונות (ANOVA) – חנקן באצות.....48
- טבלה 15: סטטיסטיקה תיאורית – חלבון באצות.....49
- טבלה 16: ניתוח שונות (ANOVA) -חלבון.....49
- טבלה 17: סטטיסטיקה תיאורית – פחמן.....50
- טבלה 18: ניתוח שונות (ANOVA)-פחמן.....50
- טבלה 19: ניתוח שונות – גופרית.....52
- טבלה 20: ניתוח שונות (ANOVA) – גופרית.....52
- טבלה 21: תוצאות למבחן Tukey עבור תוצאות DGR.....54
- טבלה 22: סיכום תוצאות הגידול מהסימולציות.....54
- טבלה 23: סטטיסטיקה של תוצאות הגידול.....55
- טבלה 24: צילומי מעקב שינוי וגדילה באצת *Ulva* במהלך הגידול.....56

רשימת הנספחים

82.....	נספח 1: טבלת חלקים בצנרת המערכת.....
84.....	נספח 2: טבלת רכיבים חשמליים במערכת PBR.....
86.....	נספח 3 - גרף כיוול למכשיר PAM.....
88.....	נספח 4: מבחני המשך-מימן.....
89.....	נספח 5: מבחני המשך-חנקן.....
90.....	נספח 6: מבחני המשך-חלבון.....
91.....	נספח 7: מבחני המשך-פחמן.....
92.....	נספח 8: מבחני המשך-גופרית.....

1. מבוא

בשנים האחרונות מתקיים שיח נרחב בנושא אוכלוסיית העולם אשר מנתה 7.4 מיליארד איש (בשנת 2016) וצפויה להגיע בשנת 2050 ל-9.7 מיליארד, מצב שיצור ציפייה לגידול במקורות המזון שמוערך ב-60%-70 בין השנים 2005-2050¹. למעשה, גידול האוכלוסייה ועלייה ברמת החיים באזורים שבהם צפויים שינויי אקלים יגדילו משמעותית בעתיד את הביקוש למזון ודלק.² חלופה אפשרית לגידולים ביבשה עשויה להגיע מגידול ימי של מאקרו-אצות, מאחר שגידול וקצירה של מאקרו-אצות בשטחים ימיים עשויים לשמש לא רק להפקת ביו-דלק אלא גם למאכל אדם ובעלי חיים.²

ידוע ששימוש בדלק פוסילי אינו מיטיב עם הסביבה, ויש לו השפעה שלילית על הכלכלה, חיי האדם ובריאותו, מאידך קיים רצון ממשלתי וציבורי לעבור לתשתיות ברות קיימא שיספקו תחליף דלק נקי יותר.³⁻⁵ ביו-דלקים יכולים להוות תחליף לשימוש בדלק פוסילי, בשונה ממקורות אנרגיה קונבנציונליים, אלו למעשה גידולים חקלאיים אשר דורשים (כתלות בסוג הגידול) אספקת מים וקרקע/שטח זמינים. היתרון המובהק של מאקרו-אצות (מרוב סוגי הגידולים המשמשים להפקת ביו-דלק) הוא בכך שאין צורך בשטחים חקלאיים נרחבים ובמים מתוקים חיוניים על מנת לגדלם.⁶ הביומסה שלהם נחשבת גלם לביו-ריפיינרי ולייצור ביו-דלק,^{7,8} ויש להם יכולת המרת אנרגיה שמש טובה לביומסה. בנוסף לכך, ספציפית ל *Ulva* ריכוז נמוך של ליגנין (חומר שמעכב תסיסה) – יתרון משמעותי בהשוואה לביומסה יבשתית.² כמו כן, השימוש בדלק ממאקרו-אצות אינו משנה את מאזן גזי החממה כיוון שתהליך פוטוסינתזה צורך מן האטמוספירה את הפחמן הדו-חמצני הנפלט מאוחר יותר בעת שריפתו (לפיכך מסתמן כמקור אנרגיה בר-קיימא מבחינה סביבתית).^{9,10}

למרות היתרונות הרבים שתוארו הפוטנציאל העצום של האצות לאחר קצירה כמקור לביו-דלק ידידותי לסביבה טרם מומש.^{11,12} סיבה לכך היא שעדיין ישנו מחסור בכלים מדעיים שיסיעו לנבות/לחזות את קצב הגדילה של המאקרו אצות בגידול ימי רחוק מהחוף.¹³ על מנת להתגבר על פער החיזוי ולבחון פוטנציאל לגידול ביומסה ימית של מאקרו-אצה *Ulva* מקומית יש לבצע שכלול של תנאי גידול מגבילים והכרחיים הקיימים בים התיכון, אשר כוללים פרמטרים הנדסיים, פיזיקליים וביוכימיים. לא ידוע גם מה תהיה ההשפעה של כמות מאקרו-נוטריינטים ידועה במדיום הימי על קצב גדילתה של האצה לייצור הביומסה, ובחינת משקל חומר הגלם. לפיכך, הנושא הכללי של מחקר זה מתמקד בחיזוי של גידול האצות, והתוצאות יספקו ידע והבנה לקידום חקלאות ימית של אצות רב-תאיות כחומר גלם לביו-ריפיינרי.

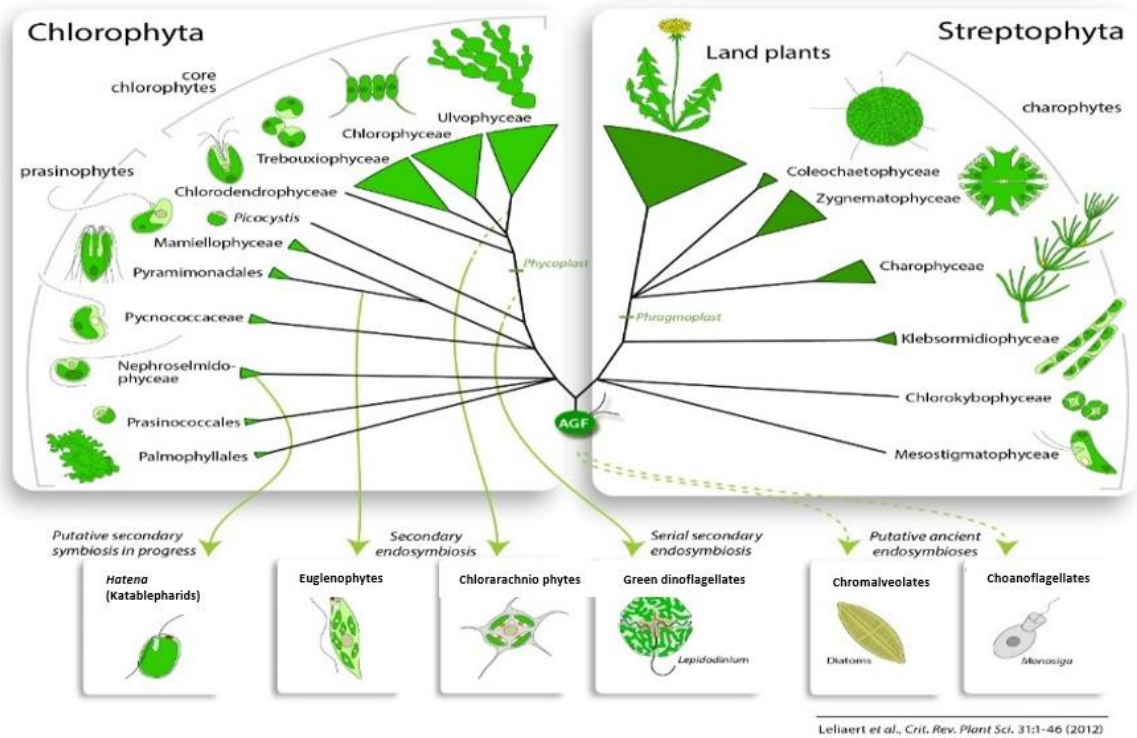
למחקר זה נבחרה מאקרו-אצה ירוקה *Ulva sp* המאופיינת ביתרונות כמו: (1) קצב גדילה מהיר,¹⁴ (2) בעלת ערכים תזונתיים,¹⁵ (3) אצה מקומית בים התיכון,¹⁶ (4) קלה לקצירה (בשל גודלה),¹⁷ (5) בעלת הסתגלות לתנאים מגוונים ונמצאת בתפוצה נרחבת.^{18,19} בעבודה זו נפתח במעבדה הדמיייה של תנאי ים המאפיינים תכונות ספציפיים של הים התיכון בעונות השונות. כמו כן נחקר כיצד שימוש בריכוזי נוטריינטים (חנקן וזרחן) שנמצאים במי-עומק שיכולים להגיע למעלה בעזרת (artificial upwelling) (AU) משפיע על גדילת מאקרו-אצה *Ulva* במערכת גידול מעבדתית.

1.1 רקע תיאורטי של מאקרו-אצות

המושג "אצות" מתייחס לאוסף של אורגניזמים מממלכות פילוגנטיות שונות.²⁰ מבחינה היסטורית סווגו כ"אצות" אורגניזמים שוכני מים חסרי מערכת וסקולרית, אך בעלי יכולת לביצוע פוטוסינתזה.²¹ הקבוצה משתרעת על פני מגוון של מינים, החל מחיידקים חד-תאיים או חוטיים (Filamentous) ועד לאורגניזמים אוקריוטיים חד או רב-תאיים²⁰ וגדלים שונים, החל מאצת ה-Micromonas שגודלה מיקרון ועד לאצות ענק (Giant Kelps) המגיעות ל-60 מטר.²² ניתן לחלק את עולם האצות לשתי קבוצות עיקריות: מיקרו ומאקרו-אצות – המיקרו-אצות הן אורגניזמים חד-תאיים היכולים להופיע גם בשרשראות או צברים, בעוד המאקרו-אצות הן אורגניזמים רב-תאיים. בשנים האחרונות גוברת ההתעניינות באצות למטרות הפקת אנרגיה, מזון וחומרים לתעשיית הקוסמטיקה. על רקע המחסור במים מתוקים בעולם ובשטחי אדמה ראויים לחקלאות, הופכים גידולים חקלאיים במי ים לאטרקטיביים מאוד. ברקע תיאורטי זה אתייחס לפוטנציאל הגלום בגידול מאקרו-אצות מסוג *Ulva* לצרכים תעשייתיים מחד גיסא, בפלטפורמת הביו-ריפיינרי, ולפער הידע אשר לתנאי הגידול הקיימים בסביבה ימית, מאידך גיסא. בסוף הסקר אמליץ על כיווני מחקר חשובים ומומלצים בהקשר זה.

1.2 פילוגנטיקה וסיסטמטיקה של אצת ה-*Ulva*

המאקרו-אצות ובתוכן ה-*Ulva* משתייכות לצמחים הירודים בכך שאין להן שורשים, גבעולים ועלים, וגם לא מערכות הולכה. נהוג לחלק את המאקרו-אצות לפי הפיגמנטציה שלהן לירוקיות (Chlorophyta), חומיות (Phaeophyta) ואדומיות (Rhodophyta). ה-*Ulva* (בעברית חסנית, או "חסת ים") היא סוג (genus) של מאקרו-אצה המוגדרת טקסונומית כשייכת למערכה Chlorophyta (מערכת האצות הירוקיות מוגדרות כקוסמופוליטיות), למחלקה Ulvophyceae, לסדרת Ulvales, למשפחת *Ulva* ומשפחת Ulvaceae. ניתן לראות את המערכה Chlorophyta באיור מס' 1 "חלק מהעץ הטקסונומי של האצות והצמחים הירוקים". ה-*Ulva* הוגדרה לראשונה על ידי Linnaeus בשנת 1753. בתוך סוג זה ישנם מינים רבים (עד היום יותר מ-500 מינים ב-Algaebase, מתוכם כ-100 אושרו טקסונומית).



איור 1: חלק מהעץ הטקסונומי של האצות והצמחים הירוקים.

ניתן לראות את מחלקת ה *Ulvophyceae* למעלה, בצד שמאל.²³

1.3 פיזיולוגיה ומחזור החיים של ה-*Ulva*

ה- *Ulva* היא מאקרו-אצה המשתייכת לאצות הירוקות ומורכבת משתי שכבות תאים עם מורפולוגיה שטוחה או צינורית, מאחז (Holdfast) וריזואידים דקים המאפשרים לה להיצמד למשטחים.²⁴ אורכה יכול להגיע לכ- 50 ס"מ וצבעה ירוק מבריק-ראה איור מס' 2: " יצע של האצה *Ulva*". עם זאת, גודלה, צבעה של ה-*Ulva* וכמות החלבון שבה תלויים מאוד בגיל התארוס ובתנאי המחיה (הרכב המים, תנאי התאורה, תהליכי התייבשות ועוד), ולכן מגוון המופעים שלה גדול מאוד. היא יכולה להתקיים ולשגשג בסביבות אקוויטיות מגוונות הכוללות מים מתוקים, מים מלוחים ואף מי ביוב.²⁵ בים ניתן למצוא את ה-*Ulva* בתחום הכרית, שם היא נחשפת לאוויר לעיתים קרובות. ניתן למצוא אותה גם בתחום תת-הכרית, בעיקר בעונת החורף. ה-*Ulva* אומנם נוטה להיצמד למשטחים סלעיים עם הרזואידים, אך ניתן גם לגדלה בקלות כאשר היא צפה במים, ואפילו על גבי אצות אחרות כ-epiphyte.²⁶ כמו כן, ה- *Ulva* מסוגלת להשתמש בביקרבונט הנמצא בריכוזים משמעותיים (הולכים ועולים)

במי הים.^{27,28} בטבע היא מרכיב מרכזי בתפריט של דגים וחסרי חוליות ימיים רבים. בין המינים ניתן למנות שמות, כמו: *U. scandinavica*, *U. rotundata*, *U. linearis*, *U. neapolitana* ועוד.²⁹



איור 2: יצע של האצה *Ulva* (צילום: נועם ר')

באצות בטבע קיימים שני תהליכי רבייה: רבייה א-מינית, ורבייה מינית. ברבייה מינית ישנו איחוי או התמזגות של תא מין זכרי עם תא מין נקבי שממנו מתפתח האורגניזם החדש.³⁰ מחזור חיים של ה-*Ulva* הוא משתנה שכולל את שני השלבים, שבהם התאלוס/יצע נראה זהה, והמאפיינים דומים, אבל ישנו הבדל בהפלואידיות שלו, כלומר במספר הכרומוזומים. ההבדל ביניהם הוא האם יש סט אחד של כרומוזומים, או סט כפול (סט בודד-בהפלואידים יש רק סט אחד של כרומוזומים/החומר הגנטי) ואילו לעומתו, קיים הדיפלואידים (בדיפלואידים סט כפול של כרומוזומים/חומר גנטי מוכפל). השלב במחזור החיים שבו החומר הגנטי מוכפל נקרא ספרופיט (sporophyte). כאשר הספרופיט נמצא בשלב המיני הוא משחרר ספורות אפלואידיות בעלות ארבעה שוטונים (לזאוספורות יש יכולת שחייה), וכשהיא תתיישב היא תשיל את השוטונים שלה וממנה יגדל הגמטופיט (gametophyte) – שהוא השלב השני במחזור החיים הקרוי אפלואידים. לאחר מכן, כאשר הגמטופיט נמצא בשלב המיני הוא משחרר גמטות/ספורות בעלות שני שוטונים עם יכולת שחייה. כך, אם תא ממין זכר יפגוש תא ממין נקבה (במקרה של ה-*Ulva* מדובר בשני סוגים, גמטות חיוביות עם גמטות שליליות) תיווצר זיגוטה שהיא תהיה דיפלואידית בתהליך האורך בממוצע כ-60 שעות.³¹

1.4 ביו-ריפיינרי (Biorefinery)

בפרק זה נתאר את מושג הביו-ריפיינרי (biorefinery) בקווים הכלליים. בנוסף לכך, נתמקד ביישומים של המושג עבור חומר גלם מאקרו-אצות, נדגים ספציפית בדוגמאות הממחישות את השימוש בעקרון התהליך בצורה אינטגרטיבית. לאחר מכן נסקור סיכונים ובעיות סביבתיות אפשריות בגידול מסיבי של חומר הגלם הזה בים, ונתייחס למספר פערים ביישומה של השיטה.

למושג ביו-ריפיינרי ניתנו מספר רב של הגדרות, שכן הרעיון האינטגרטיבי שלו חדש יחסית, ויישומה של שיטה זו מתפרש על פני אפליקציות שונות ומגוונות, לכן גם ההגדרה וגם יישומה נמצאים בשלבים שונים ומוקדמים של מחקר ופיתוח.

ביו-ריפיינרי תואר בהרחבה בדו"ח של ארגון IEA (International Energy Agency) לשנת 2009, אשר הוקדש לסקירת מצב עדכני בתחום כ"עיבוד בר-קיימא של ביומסה למגוון של מוצרים סחירים ואנרגיה". הרעיון הוא שילוב רעיון הביו-ריפיינרי באשכולות שונים של התעשייה, ומקסום ערך התוצרים הסופיים של חומר הגלם. זאת כאשר מבחינת הקיימות ישנה התייחסות להיבטים חברתיים וסביבתיים, ומבחינת תעשייתית יש התייחסות לכלכליות התהליך, שכן מדובר גם ברצון להחליף למעשה דלקים מאובנים מזהמים בדלקים מחומר גלם מתחדש.³² חומר הגלם בתהליכי העיבוד השונים כולל סוגים נפרדים של ביומסה: ביומסה ימית, עץ, גידולים חקלאיים ושאריות שונות של ביומסה. אלו הופכים לתוצרים העיקריים (או תוצרי ביניים, או תוצרים סופיים): מזון, תוספי מזון, כימיקלים ואנרגיה. הפוטנציאל לפיתוח תחום זה בשימוש סוגי הביומסה השונים הוא גדול, ומציע הזדמנויות תעסוקה חדשות לאורך כל שרשרת הערך,³³ כך שבתהליך שונה מתהליכי הזיקוק המסורתיים ביו-ריפיינרי מייעד את חומר הגלם ל- "bulk chemicals".³⁴

1.4.1 ביו-ריפיינרי מאצות

לאחרונה מאקרו-אצות ימיות מושכות תשומת לב רבה משום שהן יכולות לשמש חומר גלם אפשרי ומתחדש מבוסס פחמן לביו-ריפיינרי.^{34,35} פרוצדורה של ביו-ריפיינרי ממאקרו-אצות כוללת בהכרח את גידול האצות, קצירתן ולבסוף השימוש בהן כחומר גלם בתהליכי העיבוד השונים של הביו-ריפיינרי. מיני מאקרו-אצות פוטנציאליות ניתן לגדל בחוות גידול על בסיס תשתית ימית כדי לקבל חומר ביולוגי-אורגני. בהמשך התהליך ביומסה ימית שכזו תשמש חומר גלם בודד שניתן לפצלו למספר גדול של יחידות בסיסיות (שומנים, פחמימות, חלבונים, פיגמנטים וכו'), אשר ניתן להמירן בשלב הסופי למוצרים בעלי ערך מוסף (ביו-דלק לתחבורה, חשמל, כימיקלים, תוספי מזון וכו'). בתהליך גדילתן, כחלק מתהליך הפוטוסינתזה, האצות מייצרות סוכרים. עיבוד ומיצוי של סוכרים אלו (חומרי הזנה) מייצרים את המרכיב למוצרים מבוססי תסיסה שונים, כך שהסוכר שבהם נצרך בהמשך ומופק הביו-דלק מחומר מתחדש. תהליך משמעותי וחשוב, בעיקר בעידן שבו יש רצון עולמי לעבור לכלכלה בעלת טביעת פחמן נמוכה. לגידול ביומסה כזאת ישנם יתרונות סביבתיים רבים מאחר שכבר בתהליך הגידול של המאקרו-אצות לא נגרעים מי שתייה וקרקעות המיועדים להשקיה ולגידול של מקורות מזון יבשתיים, בשונה מביומסה יבשתית.^{8,33}

1.4.2 דוגמאות ליישום תהליך הביו-ריפיינרי

דוגמה לשימוש ברעיון של ביו-ריפיינרי ניתן למצוא במחקר משנת 2015,³⁶ שבו הוצג תהליך יעיל לטיפול בביומסה ימית – מאקרו-אצה אדומית מסוג "*Gelidiella*". המחקר אומנם בוצע בקנה מידה קטן (1 טון ביומסה), אולם זו הפעם הראשונה שבה הצליחו לייצר בתהליך גמיש של הביו-ריפיינרי מיצוי רציף של מספר תוצרים. במחקר שולבו תהליכים של כימיה ירוקה, תוך כדי הימנעות מסיכונים סביבתיים ועלויות מיותרות, והצליחו לייצר חמישה מוצרים שונים בעלי ערך כלכלי בתעשייה, כגון: שני פיגמנטים מסוג

"phycoerythrin", שומנים, אגר, מינרלים שונים ותאית (צלולוז).³⁶

דוגמה נוספת ליישום תהליך ביו-ריפיינרי ימי סוקרה במחקר חדש משנת 2017,³⁷ שבו תואר פיתוח ביו-ריפיינרי מאצה חומית *Laminaria digitata*, לאחר ליקוטה מחופיה הדרומיים של בריטניה לצורך פיתוח תהליך פירוק כימות/ייצור של תרכובות ביו-אקטיביות, ביו-דלק וכימיכל. ראשית הוצאו מאצה זו פוליסכרידים בעלי ערך כלכלי (fucoidan & alginate). כדי להעריך את השפעת התהליך על שאר הרכיבים השארתיים באצה בוצעה אנליזה להערכת התרכובות (לפני ואחרי), ונתגלה כי תכולת החלבון עלתה מעט, מה שמקנה לתהליך שבוצע "ערך מוסף". משאריות הסוכרים הופק בהצלחה ביו-אתנול (ללא אופטימיזציה).

1.4.3 אקוסיסטמה ימית וגידול אצות לביו-ריפיינרי ימי

גישת הביו-ריפיינרי היא אפשרית, חדשנית ובת-קיימא המאפשרת להתחרות מול השיטות המסורתיות להפקת מזון, כימיקלים ודלקים פוסיליים. ככל שגובר הביקוש לחומרים אלה בעולם מתפתח שבו ישנה עלייה מתמדת בגידול האוכלוסייה, כך גדלות גם הבעיות הסביבתיות. אנו למדים אפוא כי הצלחת ביסוסה של ביו-תעשייה ירוקה בת-קיימא המבוססת על האוקיינוס עשויה להביא להפחתת הביקוש והלחץ האנושיים מהמשאבים היבשתיים השונים.³⁸ התמקדות בסיכונים הסביבתיים האפשריים ביישום ביו-ריפיינרי ימי רחוק מהחוף תוך כדי גידול מאקרו-אצות בסקלה גדולה מצביעה על בעיות סביבתיות מסוימות, דווקא בנישה של גידול חומר הגלם, וכן בהתפשטות חומרי הזנה הכרחיים בחוות גידול שעשויים להשפיע על האקוסיסטמה (סביבה) הימית באזור (בתי גידול ומגוון ביולוגי).³⁹ כמו כן, גידול בסקלה רחבה ובצפיפות גדולה עשוי להאפיל צל על תחתית אזור הגידול, ולהגביל בכך את הפעילות הפוטו-סינטטית של יצורים אחרים, כך במקרה של מוות מסיבי של האצות תיתכן ירידה ברויית החמצן במים (הפוקסיה) מה שעלול לגרום למות יצורים אחרים. במקרים של איחור בקציר האצות, וחוסר בבעלי חיים רועים תיתכן תופעה שלילית-העתרת מקומית באזור בית הגידול. בעיות אחרות ונוספות שעלולות להיווצר בגידול מסיבי של מאקרו-אצה באזורים ימיים מוגדרות כ"מין פולש" תופעה שעלולה להשפיע לרעה על האצות ושונות האלמוגים המקומיות.^{2,40,41} באופן כללי ידוע כי תהליכי פוטוסינתזה כולל תהליכי הנשימה יכולים לגרום לשינויים בערך הגבה ולהשפיע על אורגניזמים אחרים.⁴² במקרים מסוימים מאקרו-אצות למעשה עוזרות ומקילות בתהליכי אאוטרופיקציה המתרחשים באוקיינוסים,⁴ ואף בקרבת החוף.⁴³

בספרות סוקרו מספר עבודות מחקר קודמות בתחום גידול מאקרו-אצות בים, ואחת מהמקיפות בוצעה בגרמניה בשנת 2004.⁴⁴ האצה שבחנו במחקר הייתה ממין kelp שעבורה פותח מתקן גידול שהוצב בים בשני אתרי הגידול הרחוקים מהחוף, ובשלושה אתרים הקרובים לחוף, ובמהלך הניסויים נוטרו כלל הפרמטרים הסביבתיים. תוצאות המחקר הראו שונות בריכוז הדשנים החיוניים כתלות במיקום ובעונה, אם כי בכמות מספקת כדי לתמוך בגידול האצות. השפעות סביבתיות שתוארו מוקדו לאזור בעל ריכוז טבעי גבוה של דשן, המאופיין בתחלופה נמוכה של מים. אלו הביאו להתיישבות מספר מינים של אורגניזמים ימיים (בעיקר מולים כחולים) על מערכת הגידול, ובין החודשים מאי-יוני תועדו אפיפיטים שונים אפיזואניים, לרוב מסוג *Ciona intestinalis*, אשר השפיעו לרעה על כמות הביומסה, על חבלי הגידול והטבעת ההיקפית של מערכת/חוות

הגידול אשר הוכתרה לאחר הניסויים כמערכת מוצלחת למדי. בדבר אזורי הגידול המומלצים ישנה התייחסות לריכוזי פחמן דו-חמצני, חמצן מומסים גבוהים, ולעכירות מים נמוכה.

מחקר קודם משנת 2002,⁴⁵ שבחן את קצב הגידול של הזן *Ulva rigida* בסקלה קטנה באמצעות כלובים שהוצבו בארבעה אזורי לגונות שונים בים התיכון (איטליה וצרפת) המאופיינים ברמות אטרופיקציה שונות. הטכניקה של השמת כלובים לגידול מאפשרת לבחון בקלות השפעות התנאים המקומיים על האצה במתודולוגיה זהה לפרקי זמן ועונתיות נבחרים באתרים הקרובים לחוף. הסברה לתוצאות הגדילה הנמוכים שנמצאו קושרה לרעייה של האצות מהכלובים.

בספרות ניתן למצוא גם מחקרים ספורים על גידול זנים נוספים של המין *Ulva*, בעיקר גידול משולב עם דגים הידוע לרוב בשם: integrated multi-trophic aquaculture (IMTA).¹⁸

1.4.4 פערים ואתגרים בגידול ויישום ביו-ריפיינרי

הפוטנציאל של מאקרו-אצות עבור ביו-ריפיינרי טרם הוערך די הצורך ברמה גלובלית ומקומית, כמו כן ביצוע הטמעת האצות ברעיון הביו-ריפיינרי עדיין דורש פיתוח ויעול של טכנולוגיות עיבוד שונות. שימוש בטכנולוגיות שיפותחו יוביל במבחן התוצאה לתהליך יעיל מבחינה אנרגטית (עלויות השקעה מול תועלת), ולאפס שאריות/פסולת בתום תהליך ההמרה לתוצרים המגוונים.^{2,11} דרך קיימת לבחון בצורה חלקית את הפוטנציאל הכלכלי של מאקרו-אצות לתעשיית הביו-ריפיינרי עבור ייצור ביו-דלקים ו/או ביו-כימיקלים היא ביצוע אנליזת TEA (techno economic analysis) ספציפית ומקיפה, אשר אינה כוללת את המידע החשוב לגבי עלויות תהליכי הגידול, מיקומים פוטנציאליים ותפוקות ביומסה ליחידת זמן, שמטבע הדברים יש לבחון לכל אזור ימי בגלל שונות גדולה בתנאים הביולוגיים והפיזיקליים.⁴⁶

הדרכים השונות שתוארו לשימוש באצות כחומר גלם תלויות, כאמור, בקיומו וזמינותו של חומר גלם מתחדש זה. אומנם כיום לא ידוע מהו פוטנציאל גידול אצות ממין *Ulva* על בסיס תשתית ימית המורכבת מאינטראקציית פרמטרים, ובמקומות שונים במזרח הים התיכון (ישראל). בשל חשיבות אומדן הפרודוקטיביות והדינמיקה של גידול מאקרו-אצה בלב ים, נחקר נושא זה בתנאי המעבדה על חומר הגלם מאקרו-אצה *Ulva*, ונפתח למעשה את שיטת החיזוי לים שחווה את כושר ייצור אצות.

2. סקירת ספרות

2.1 תפקיד האצות בסביבה ובמאזן הפחמן הגלובלי

החשיבות הגדולה של האצות היא בכך שחלק משמעותי מהפחמן שהן מקבעות מגיע לקרקעית האוקיינוס בתהליכי סדימנטציה ישירים או עקיפים, וכך יכול להפחית מריכוזי ה- CO_2 בסביבה.⁴⁷ העלייה המהירה בריכוז ה- CO_2 האטמוספרי והימי (עלייה של כ-40% מאז המהפכה התעשייתית) היא למעשה הנושא הנחקר ביותר במדעי הסביבה כיום. התוצאות, התחממות כדור הארץ עקב העלייה ב- CO_2 והחמצת מי האוקיינוסים עקב עליית ריכוז הפחמן האי-אורגני במים הביאו להתעניינות ב-*Ulva*, שהיא בעלת תפוצה נרחבת, ולאור יכולתן של אצות ממין *Ulva* לספוח CO_2 ממי הים. נמצא כי ספיחת ה- CO_2 שלה היא הגבוהה ביותר בהשוואה לשאר המאקרופיטים הימיים.⁴⁸ סיבה נוספת וחשובה להתעניינות ב-*Ulva* היא תופעת ה"גאות הירוקה" (Green tide) – סחיפה לחוף של מסה גדולה של *Ulva*, אשר הופכת למטרד סביבתי, כלכלי ואף בריאותי (תהליך הריקבון משחרר כמויות גדולות של מימן גופרתי) עם עלויות כלכליות ניכרות⁴⁹ (הטיפול במקרה כזה בקיץ 2008 עלה לרשויות מעל 100 מיליון דולר).

2.2 יישומים של אצות בתעשייה

תעשיית האצות מחולקת למיקרו ומאקרו-אצות, ולכל קבוצה יתרונות וחסרונות משלה, וניתן לגדלן ביבשה על קרקעות לא יצרניות או נטושות.⁵⁰ למיקרו-אצות יש תכולת שומן הרבה יותר גבוהה, ולכן הן פופולריות בתחום האנרגיה וחומרים שומניים לתעשיית הקוסמטיקה. לעומת זאת, למאקרו-אצות תכולת סוכרים גבוהה יותר ומעט שומן, ולכן הן יכולות לשמש בסיסי למזון דל שומן ולסיבים תזונתיים, וכן להפקת אנרגיה במסלול של פרמנטציה סוכרים. גודלן של המאקרו-אצות (בסקלה של סנטימטרים) הוא יתרון ביישומים הדורשים "קציר" של האצות, כמו למשל טיהור מים (מיקרו-אצות הן בדרך כלל בגדלים של טווח המיקרון, ולכן נוה פחות לאספן). מאקרו-אצות ממין *Ulva* ובכלל, משמשות את האדם משחר ההיסטוריה, שכן אבני הדרך של התעשייה בהן החלו בשנות ה-70 המוקדמות בישראל, יפן ומספר מדינות באירופה.³ כיום מדובר על כ-221 מינים בשימוש (בכל העולם),⁵² עם יישומים רבים ושונים החל ממזון ועד לאנרגיה,⁵³ ובשנים האחרונות מגמת הפיתוח והתיעוש הולכות וגוברות. כדי להגדיל את הנצילות ואת הכדאיות הכלכלית ישנו מחקר ענף בתחום של פיתוח ביו-ריפיינרים – מתקנים הדומים ל"בתי זיקוק" אשר מפיקים חומרי אנרגיה, אך גם מנצלים את תוצרי הלוואי לשימושים אחרים,³⁵ עם כוונות לגדל מאקרו-אצות בסקלה גדולה בים במסגרת שתאפשר עליות נמוכות בגידול כמות גדולה של חומר גלם (אצות) עבור "Bulk products".⁵⁴ בתתי-הפרקים שלהלן נתמקד ביישומים השונים הקיימים לאצות ה-*Ulva* ונסקור אותם.

2.2.1 יישומים בתחום טיהור המים

לאצות ה-*Ulva* מספר יישומים עיקריים בתחום טיהור וטיוב המים. ה-*Ulva* מראה פוטנציאל גבוה באסימילציה של ניטריטים ואמוניה בבריכות דגים,¹⁸ שם הריכוז של חומרים אלה יוצר בעיות סביבתיות ורגולטוריות קשות. כמו כן הוכח שאסימילציה של חנקן מעלה את תכולת החלבון באצות (פי 2-4 מאשר בטבע), אשר בעצמן

יכולות לשמש מאוחר יותר כחומר מזון לדגים.⁵⁵ גם בטיהור מי שפכים, בעיקר בשלבי הטיהור השלישוני והרבעוני בהם מבוצעת ספיחה של אמוניה, ניטראט ופוספט ולאחר מכן מתכות כבדות, ישנו פוטנציאל גדול למיקרו ולמאקרו-אצות בזכות יכולתן לספוח יונים אלה מהמדיום ובזכות היכולת לגדלן במשטחים (Algal mats) בבריכות טיהור.^{56,57}

2.2.2 יישומים בתחום המזון, לאדם ולבעלי חיים

ידוע, כי ישנם 145 מינים של מאקרו-אצות אשר שימשו ומשמשים את האנושות לצורכי מזון עבור אוכלוסיות שונות בעולם.⁵⁸ מאקרו-אצות ובראשן ה-*Ulva* מכילות מגוון גדול של סוכרים ומעט שומנים בהשוואה למיקרו-אצות. חלק מרב-סוכרים אלה הם מקור טוב לסיבים תזונתיים עם ערך קלורי נמוך.⁵⁹ כמו בתחום טיהור המים גם כאן היכולת הגבוהה של מאקרו-אצות לספוח מתכות ומינרלים שונים מהסביבה המימית היא יתרון. מאקרו-אצות שונות כולל מינים של *Ulva*, מסוגלות לספוח מן המים מינרלים, כמו יוד, ברזל ואבץ, ויכולות לשמש בתעשיית תוספי המזון (nutraceuticals). בתעשייה זו מיוצרים מינרלים ממקור ביולוגי (בדרך כלל בכלציה של מולקולה אורגנית כלשהי), כדי לשפר את הספיגה שלו. בין הפרמטרים אשר יש להביא בחשבון נמצאות השונות ביכולת ספיחת המינרלים והזמינות של המינרלים ממקור אצה לבני האדם כתלות בתנאי המחיה.⁶⁰ אלה מדגישות את החשיבות של תנאי גידול ידועים ומבוקרים בהם נדון בהמשך. ה-*Ulva* משמשת גם כמזון רגיל לבני אדם, במיוחד בשוקי אסיה, אך גם באירופה, והיא נמכרת בחו"ל זה זמן רב ומשווקת בשם "sea lettuce".⁶¹ היא אף משווקת ביפן כחלק מהתערובת של שלוש אצות כמוצר הקרוי בשם "Aonori".⁶² ואף בספרות הרכבה התזונתי ועריכהם הווה לזה הקיים בירקות שונים, ראה **טבלה 1**: "השוואה בין ריכוזי מינרלים שונים באצות *Ulva lactuca*, *Gracilaria salicornia* וירקות שונים". כלל השוק הגלובלי של כל סוגי מאקרו-אצות (סחירים) מוערך בתעשייה בסכום של מיליארדי דולרים (5.6 מיליארד בשנת 2016)^{63,64} כאשר תעשיית הגידולים מתרחשת בעיקר במספר מדינות אסיאתיות.⁵⁴ בטבלה ניתן לראות את יתרונותיו בתכולת המינרלים של הזן *Ulva lactuca* לעומת הירקות: תרד, ברוקולי, גזר, כרוב וחסה.

ה-*Ulva* היא גם מקור מצוין לחלק מהוויטמינים, ובמיוחד B₁₂^{65,66} וכן לנוגדי חמצון רבים, וכל זאת באצה בעלת אחוז שומן נמוך. ישנם מחקרים המצביעים על השפעה חיובית במצבים, כגון כבד שומני,⁶⁷ סכרת מסוג 2⁶⁸ ומחלות כרוניות נוספות.⁶⁹ התארכות תוחלת החיים ומגפת ההשמנה, ואיתן המחלות המטבוליות הופכות את ה-*Ulva* לגידול בעל פוטנציאל כלכלי משמעותי בתעשיית המזון לצריכה אנושית גם בישראל.

טבלה 1: השוואה בין ריכוזי מינרלים שונים באצות *Ulva lactuca*, *Gracilaria salicornia* וירקות

שונים

נלקח מתוך הספרות ממחקר שפורסם בשנת 2012.⁷⁰

Mineral	<i>G. salicornia</i>	<i>U. lactuca</i>	Foodstuff (USDA ²⁹)				
			Lettuce	Cabbage	Carrots	Broccoli	Spinach
Potassium	11 380.06 ± 73.45 ^a	2414.02 ± 26.89 ^b	956.42	1931.1	3747.2	3381.2	4798.8
Calcium	948.45 ± 7.7 ^b	2782.13 ± 11.12 ^a	177.48	368.95	386.43	502.9	851.4
Sodium	1035.92 ± 61.48 ^b	1805.44 ± 58.6 ^a	138.04	141.3	807.99	353.1	679.4
Iron	67.35 ± 7.77 ^b	199.45 ± 5.86 ^a	4.23	4.63	3.51	7.81	23.3
Manganese	4.16 ± 0.05 ^a	2.11 ± 0.22 ^b	1.23	1.24	1.64	2.184	7.71
Nickel	0.92 ± 0.03 ^a	0.76 ± 0.01 ^a	-	-	-	-	-
Copper	0.57 ± 0.07 ^b	1.45 ± 0.21 ^a	0.14	0.18	0.52	0.52	1.11
Cobalt	0.24 ± 0.05 ^a	0.15 ± 0.03 ^b	-	-	-	-	-
Total cations	13 438 ± 143 ^a	7205.51 ± 102 ^b	-	-	-	-	-

Results are given as the means of triplicate determinations ± SD.
 Values in columns with different superscripts are significantly different ($P < 0.05$).
^{a,b} Means in columns with different letters are significantly different ($P < 0.05$).

2.2.3 האצה כמקור מזון לבעלי חיים

יישום נוסף הוא בתחום מזון לבעלי חיים. מאקרו-אצות הן חלק מהתפריט הטבעי של דגים רבים, ולכן אך טבעי להשתמש בהן כתוספת למזון לדגים^{71,72} ולחלזונות^{73,74} (בעיקר מסוג abalone) שמגדלים אותם בבריכות, במיוחד במקרים שבהם מגודלות מגדלים אותן לצורך טיוב המים בבריכה. חומר הגלם זה מכיל סוכרים שאגורים כפולימרים בדפנות תאי המאקרו-אצות, והם ניתנים לביקוע בעזרת תגובת ההידרוליזה.

2.2.4 שיטות קיימות להפקות ביו-דלקים מאצת ה- *Ulva*

הפקת ביו-דלקים מצמחים ואצות היא נושא רלוונטי וחשוב כיום בתחום האנרגיות המתחדשות.⁷⁵ בחישוב גלובלי שימוש בדלקים כאלה אינו מעלה את ריכוז ה- CO_2 באטמוספירה (הוא רק "מחזיר" אליה את ה- CO_2 שהצמח הטמיע במהלך חייו), וזאת בניגוד לדלקים פוסיליים.⁷⁶ בעוד שבייצור האנרגיה ממיקרו-אצות ההתמקדות היא בניצול תכולת השומן בתאים אלה, במאקרו-אצות כמו ה-*Ulva* ייצור האנרגיה מבוסס בעיקר על ניצול רב-סוכרים (מאקרו-אצות נוטות יותר לייצר חומרים אלה מאשר שומנים).²¹ סוכרים אלו אגורים כפולימרים בדפנות תאי המאקרו-אצות⁷⁷ אשר נחשבים לייצור ביו-דלק מהדור השלישי שהוא בעל יתרונות סביבתיים לעומת ייצור דלק פוסילי,⁷⁸ ואף יתרונות בהשוואה לייצור ביו-דלק בשיטות של הדור הראשון והשני.⁷⁹

באשר לשיטות הפקת האנרגיה העיקריות, נציין שלוש:

בעירה ישירה: שימוש באצה לבעירה כחומר יבש להפקת אנרגיה אינה כדאית, כפי שנטען בעבודות מהשנים האחרונות, מבחינת ה-EROI (Energy Return Of Investment) מהסיבות הבאות: השקעת האנרגיה הגבוהה בייבוש האצות, וכן הריכוזים הגבוהים במיוחד של יונים אי-אורגניים (ובמיוחד מתכות אלקליות) במאקרו-אצות ובמיוחד ב-*Ulva lactuca* גורמים לבלאי מוגבר של הריאקטורים המשמשים לשריפה.⁸⁰

טרנס-אסטרפיפקציה: שימוש בשומן על מנת להפיק ביו-דיזל גם כן אינה משתלמת באצות ממין *Ulva* עקב תכולת השומן הנמוכה (6.2% ב-*Ulva lactuca*)²¹ אך ישנם מינים של מאקרו-אצות עם תכולה גבוהה יותר.⁸¹

פרמנטציית סוכרים: הריכוז הגבוה של carbohydrate באצה *Ulva* (42%)⁸² ובמיני מאקרו-אצות נוספים מספק למעשה יתרון להפקת ביו-אתנול או בוטנול בפרמנטציית סוכרים.⁷⁸ מסלול פרמנטציה שכזה מורכב מתהליכי הידרוליזה שונים (הגורמים לביקוע הסוכרים), ובהמשך בשלב משלים של התססת הסוכר (פרמנטציה) על ידי שמרים ספציפיים לקבלת ביו-אתנול. ישנו גם תהליך המשלב את תהליך הפירוק והפרמנטציה לתהליך אחד (SSF).⁸³

2.2.5 סיכום יישומים לאצת ה-*Ulva*

כפי שראינו עד כה, ישנם יישומים תעשייתיים ופוטנציאל לא מבוטל לגידול ה-*Ulva*. על מנת להביא את יישומי ה-*Ulva* לרמה תעשייתית בוצעו מחקרים רבים לטובת אופטימיזציה של תפוקת ה-*Ulva* לייצור תעשייתי. כמו כל ענף חקלאי או תעשייתי נעשו עבודות רבות כדי לשפר את התפוקה של גידול אצות. כמו כן, בוצעה עבודה רבה בתחום של מודלים מתמטיים לגידול אצות בתנאים שונים. בדרך כלל מדובר בפיתוח מודלים גנריים שבהם מוצבים קבועים ופרמטרים שונים מתוך הספרות, כגון קצבי גידול, קצבי פוטוסינתזה ועוד.⁸⁴ תהליכים קודמים (שלא דרך רעיון הביו-ריפיינרי) בעלי חסרון שכן לא מנצלים בהם מספר אלמנטים שבאצה, אלא עושים שימוש באלמנט בודד (לרוב משמשות כמזון למאכל). לביו-ריפיינרי ממאקרו-אצות יש בהחלט פוטנציאל ומקום בתעשיית המזון, שכן בסוף התהליך נשארים יותר מ-80% מחומר הגלם ללא שימוש.⁸¹

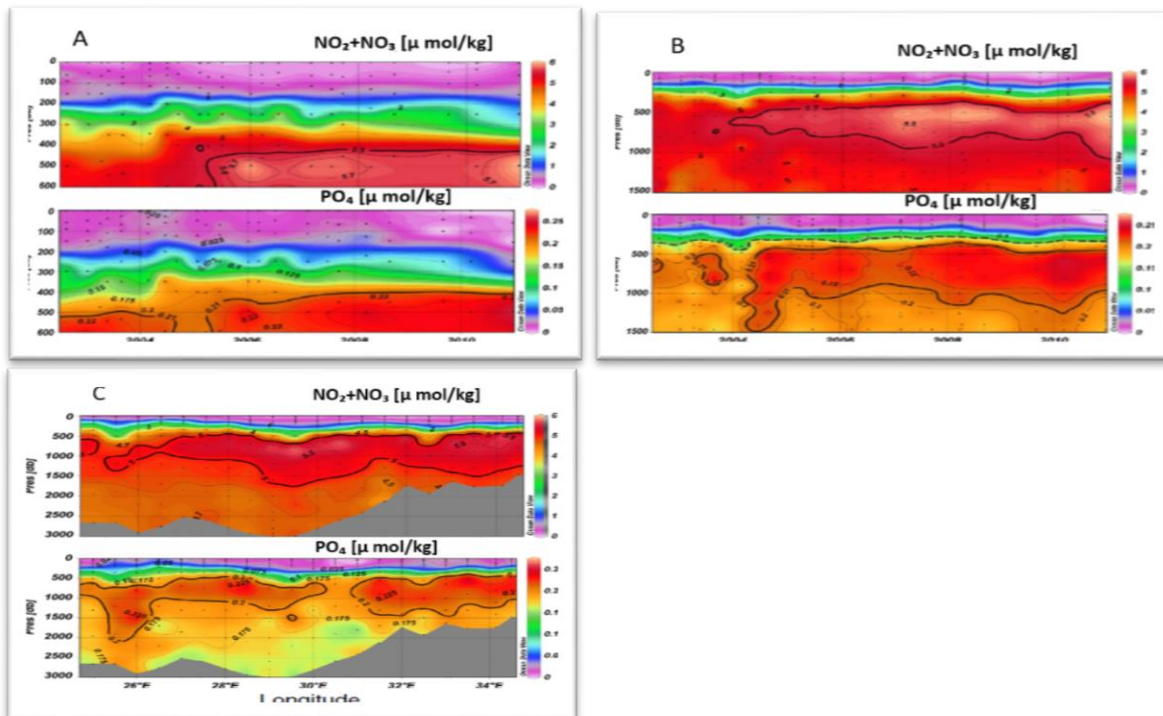
2.3 תנאי גידול בים תיכון

2.3.1 נוטריינטים

תנאי הגידול בים התיכון הושפעו ומושפעים ממספר גורמים, ולמעשה בהיבט של ריכוז הדשנים והעתרה. סכירת נהר הנילוס במאה העשרים (1965) בסכר אסואן (Aswan) השפיעה בצורה משמעותית על הסביבה הימית של הלוונט מבחינת ריכוז דשן, שכן בזמנו נחשב למקור עיקרי לנוטריינטים עבור אגן הים התיכון.⁸⁵ עובדה היסטורית זאת הפכה את הסטטוס של מזרח הים התיכון כיום לגוף מים דל משמעותית בריכוזי נוטריינטים, ואף מלוח יותר.⁸⁶⁻⁸⁸ נוסף על כך, לזרימת המים באגן הים התיכון הסגור למחצה ישנם מאופיינים במשטר זרמים שונה הנקרא – "reverse thermohaline", כיוון שדרך מצרי גיברלטר מגיעים מים עניים בנוטריינטים ויוצאים מים עשירים בנוטריינטים.⁸⁹ תנאים אלו ועוד גרמו לכך שלאזור המזרחי והמערבי באגן הים התיכון הוגדרו רמות טרופיות שונות: "ultra-oligotrophic" לאזור המזרחי, ו"oligotrophic" לאזור המערבי.⁹⁰

לעומת הגורמים המחסירים שתוארו לעיל, ישנם גם מספר מקורות מזינים לאגן, ואלו כוללים בעיקר מקורות אטמוספריים (באמצעות אבק, או אירוסולים ומי גשם).^{87,91} חלקם הוגדרו למעשה כשטפים של חנקן וזרחן אי-אורגניים מומסים המגיעים במי הגשמים שיורדים, וריכוזם תלוי בכמות משקעים, והם הוערכו ש-90% מה-DIN (dissolved inorganic nitrogen) ו-60% מהפוספט מגיעים ממקור אטמוספרי.⁹² ישנם מחקרים שמייחסים את הסיבה לכך שיש מהם עלייה בריכוז החנקן, ועלייה בפעילות התעשייתית של בני האדם.⁹³

מקור נוסף להעשרה בחומרי הזנה ודשן לים התיכון (אנתרופוגני) נמצא באזור החופי של ישראל (littoral regions), ומתבצע באמצעות מספר נחלים שברובם ישנו זיהום משמעותי בנוטריינטים בדרגת בינוני עד חמור. הזרמות אלו כאמור גורמות לבעיית אטרופיקציה בים התיכון. מקורם של ריכוזי הניטראט הוערכו קרוב לוודאי ממי נגר חקלאיים המכילים חומרי דשן ומתפעול לקוי של מט"שים שונים, בעוד מקורם של ריכוזי אמוניה וזרחן מגיעים לנחלים מהזרמת שפכים ביתיים ומי קולחין.⁹⁴ באופן כללי רמות הנוטריינטים יורדות (וגם רמות המליחות) ככל שמתרחקים מהחוף לאגן המערבי, ובמים הרדודים אין כמעט כלל נוטריינטים (הם מרוכזים בעיקר בקרקעית הים). בים הפתוח באזור הלבנט בעונת החורף מתבצע ערבול עמוק בעמדות המים, מה שמעשיר את המים העליונים (בצורה טבעית) לכמויות נוטריינטים גבוהות יחסית, ומגדיל את היצרנות הראשונית בהשוואה לשאר העונות בשנה.⁹⁵ במים העמוקים מגיעים יחסי החנקן וזרחן לערך גבוה בהרבה ממדד Redfield המקובל למי ים. אלו הוערכו ב-1:28~ (איור 3).^{96,97}



איור 3: אבולוציה טמפורלית של ריכוזי חנקן וזרחן בים תיכון כפי שהוצעה על בספרות בשנת 2013. ריכוזים בתחנה H03 (2004-2010). B – ריכוזים בתחנה H06+H05 (2004-2010). C – ריכוזים של חנקן וזרחן עבור חודש ספטמבר שנת 2008, לאורך חתך מערב-מזרח של אגן הלבנטין.⁹⁸

2.3.2 פרמטרים אביוטיים עיקריים בגידול מאקרו-אצה *Ulva*

משרע התנאים שבים משפיעים לבסוף על תפוקת האצות, שכן יצע של מאקרו-אצה *Ulva* זקוק למגוון תנאים אביוטיים על מנת לגדול ובהמשך להתרבות. על פי מחקרים קודמים נפרט ונכמת בפרק זה את הפרמטרים העיקריים שלהם זקוקה האצה בתהליך הגדילה והפוטוסינתזה. באופן גס ניתן לחלק את הדרישות התזונתיות של מאקרו-אצות לשלוש קבוצות: מאקרו-נוטריינטים (N,P,C וכו') מיקרו-נוטריינטים ויסודות קורט (Fe,)

(Zn, Cu, Mn, Mo) וויטמינים (כמו B12 תיאמין וביוטין). כל אחד מאלה יכול להגביל את קצב הגידול, אך מפאת קוצר היריעה נעסוק כאן רק במרכזיים שבהם.

2.3.3 אסימילציה TAN והרכב

החנקן מהווה פרמטר חשוב בנוכחותו לגידול האצות בסביבות הגידול השונות.⁹⁹ ע"מ לקלוט אותו, *Ulva* מאופיינת בכמות גדולה של ממברנות המתפרסות על התארוס המאופיין ביחס שטח פנים לנפח גבוה אשר מקנות לה קצב ספיחת דשן גבוה, זאת כאשר האמוניה נצרכת בדיפוזיה, לעומת ניטראט שעובר בעזרת הטרנספורטרים הנמצאים בממברנת התא.^{100,101}

גידול בתוספת צורני אמוניה ($\text{NH}_4^+ \setminus \text{NH}_3$) מעלה את תכולת החלבון ב-*Ulva* לעשרות אחוזים בודדות, וכן את קצב גדילת המסה.^{102,103} גידול עשיר ב-TAN ניתן למצוא ביישומים של בריכות דגים, ביבשה ובתוך הים. בתנאים מסוימים ניתן לקבל עלייה של עד 150% במסה על ידי תוספת של TAN. ישנו כמובן אופטימום שמעליו מתחילה ירידה בקצב גידול המסה.¹⁰⁴ ה-*Ulva* מסוגלת לנצל היטב גם ניטראט ($\text{NO}_3^- - \text{NO}_3^-$) ובאופן כללי, בגלל קצב הגידול המהיר שלה, וכדי להימנע ממגבלת חנקן *Ulva*, נזקקת ליותר חנקן (עד פי 30) מסוגים אחרים של מאקרו-אצות,¹⁰⁵ עם קצב ספיחה מקסימלי שהוערך באצת ה-*Ulva* בכ-150 ולאחר מכן ירידה ל- $70 \mu\text{M N g DW}^{-1} \text{ h}^{-1}$.¹⁰⁵ הוכח כי אצת ה-*Ulva* יכולה להמשיך לגדול גם לאחר שריכוז החנקן בסביבתה החיצונית נמוך עד לא קיים כלל.¹⁰⁶ ריכוז החנקן הפנימי הכולל במאקרו-אצות נמדד מהחומר היבש של האצה, ותלוי בשני גורמים עיקריים: הכמות ההתחלתית הקיימת בתא האצה, ובהמשך בריכוז החנקן במדיום הגידול.^{107,108} *Ulva* מכילה גם אחוזים בודדים של גופרית אורגנית אשר נטען כי היא נמצאת בחומצות האמינו.¹⁰⁹

לאחר הגידול ריכוז אחוז החנקן הפנימי שבאצה יכול לספק הערכה משוערת לתכולת החלבון שבה, שריכוזו באצה מושפע בטבע מתנאי הגידול בעונות השונות.¹¹⁰ בגידול האצה *Ulva lactuca* נתגלה כי בתנאי גידול עשירים בריכוז חנקן חיצוני יכול להגיע בה ריכוז החלבון ל-44% מהאצה.^{104,111} על מנת להעריך את ריכוז החלבון מודדים אחוז חנקן מהחומר היבש (DW), ולפי הספרות יש להכפילו במקדם 5.59¹¹², או 4.81 (תלוי במין האצה).¹¹³ הדרישה לחלבון מן הצומח וריכוזו באצת ה-*Ulva* מציבים את גידולה של האצה בשטחים הימיים כבעלי פוטנציאל לספק כמויות חלבון למגוון מוצרים ותעשיות, כך שפוטנציאלית היא יכולה להפחית עד כ-24% את השימוש בשטחים יבשתיים המשמשים למטרה זהה זאת.²

מאקרו אצות מכילות גם גופרית, המהווה חלק מהרכב האצה הנמדד בחומר היבש של האצה, ויכול להגיע עד ל 4%, ריכוזו באצה מושפע בעיקר מתכולת הסולפט (sulphate) הנמצאת במדיום הגידול.¹¹⁴ הגופרית מורכבת בעיקר מפוליסכרידים, אלון, חלבונים ומלחים.

2.3.4 זרחן

מבין שלושת היסודות החיוניים זרחן הוא הנדיר ביותר. מקורו מריקבון של בעלי חיים, בלאי של סלעים, אבק אטמוספרי, ואף נכנס כשפך ממקורות יבשתיים.^{4,115} אצות פיתחו יכולת טובה מאוד לקליטת זרחן והנקן מהסביבה (אלה יכולים להגיע לפי 100,000 מריכוזם במים).

2.3.5 פחמן

פחמן חיוני לגדילת אצות. מקורו העיקרי לקיבוע ב-*Ulva* ובאצות אחרות הוא קרבונט HCO_3^- המומס במים. בעזרת מעבר לקיבוע פחמן כחלק מהפוטוסינתזה, נמצא כי בעבוע של גז CO_2 דרך מי הגידול משפיע גם באופן עקיף על המטבוליזם של ה-*Ulva* בכך שהוא מגביר את קיבוע החנקן.¹¹⁶

2.3.6 אור – עוצמה וספקטרום

התלות של ה-*Ulva* כמו כל אצה, בפוטוסינתזה, מכתובה תלות ברורה בעוצמת האור בזמן החשיפה וגם בהרכב הספקטרלי. הספקטרום של האור התת-מימי מגיע למקסימום כ-550 ננומטר (אור ירוק). למרות שבגידול תעשייתי ההיתכנות לכך היא מוגבלת, מעניין לציין שהגידול המהיר ביותר של ה-*Ulva* עבור הפיגמנטים a&b מושג דווקא באור כחול (441, 468 nm) ובאדום (622, 658, 682 nm).^{117,118} מידת החשיפה לאור בטבע מושפעת כמובן מאורך היום ולכן גם מעונות השנה.

2.3.7 טמפרטורה

האצות מצויות בשיווי משקל עם טמפרטורת המים ומושפעות ממנה. ירידה בטמפרטורה גוררת ירידה בקצב הפוטוסינתזה ומכאן גם ירידה בקצב הטמעת הפחמן. במערכת סטנדרטית קצב הפוטוסינתזה המקסימלי ל-*Ulva lactuca* למשל מושג בין 32 ל-35 מע"צ (טמפרטורת המים החודשית הממוצעת בים התיכון אינה עולה בדרך כלל מעל 28 מע"צ).²⁹

2.3.8 מליחות

במיקרו-סביבות מסוימות כמו לגונות קטנות הנחשפות לאור חזק ועקב כך לאידוי מסיבי ריכוזי המלח עשויים לעלות. ריכוזי מלח גבוהים, במיוחד אלה הקרובים לרוויה, גורמים ללחץ אוסמוטי גבוה ולעקה הפוגעת, כמובן בקצב הגידול ובכושר נביטה של הנבגים.^{119,120} במחקר שבחן את השפעות מגוונות של רמות שונות של מליחות על *Ulva pertusa* נמצא כי קצב הגידול הגבוה ביותר הושג לטווחי המליחות 15-25 בעוד שקצב ספיחת החנקן והזרחן נמצאו גבוהים ביותר ברמות 20-25 psu.¹²¹

2.3.9 צפיפות

צפיפות גידול הביומסה (kg m^{-2}) גם היא פרמטר חשוב, מאחר והחל מצפיפות מסוימת, שטף קרינת השמש (irradiance) הולך ופוחת (האצות מתחילות "להסתיר" זו את זו). לכן, סוגי אצות כמו ה-*Ulva* שגדלים מהר עלולים לא להיות מתאימים לצפיפות גבוהה, כי אז הגידול הופך להיות "מוגבל אור".¹²² בנוסף לכך, במצבים

מסוימים יש לצפיפות גם השפעה בצריכה של נוטריינטים. למשל, לגידול בבריכות ע"ג היבשה הצפיפות 4kg m⁻² עבור הזן *U. lactuca* הוצעה כאופטימלית.¹⁴ (לסקירה נרחבת יותר ניתן להיסתכל בטבלה מס' 2: "ריכוז נתונים של קצבי גדילה מעבודות שונות").

טבלה 2: ריכוז נתונים של קצבי גדילה מעבודות שונות

מקור:	תפוקה מקסימלית: [$\frac{gr}{m^2 * day}$]	קצב גידול (RGR): [%] [$\frac{day}{day}$]	צפיפות אופטימלית: [$\frac{kg}{m^2}$]	טמפ':	מין:	תנאים:
Neori 1991a ⁵⁵	55 למטר מרובע ליום (DW)	18%	1-2	-	<i>Ulva lactuca</i>	בריכות דגים
Del Rio et al. 1996 ¹⁰²	12.2-40.2 (DW)	6.8% 12.6% 13.8%	4 2 1.5gr FW for 1 liter	1. (יום 23, לילה 19.1) 2. (24.2) יום, 20 (לילה)	<i>Ulva rigida</i>	בריכות דגים, תנאי תאורה וריכוזי חנקן מומס משתנים
Msuya et al. 2008 ¹⁰⁴	112-376	-	-	21-25	<i>Ulva lactuca</i>	מכלים היצוניים (דולבים) ריכוזי TAN ואורור משתנים
Bolton et al. 2009 ⁷³	19.7-26.1 (DW)		26.1 g dw m ⁻² day ⁻¹	-		בריכות גידול (raceway) Abalone בשילוב
Naldi et al. 2001 ¹²³	-	10-20%	-	-	<i>Ulva rigida</i>	ריכוזי ניטראט משתנים
Luning 1992 ¹¹⁷	-	12-13%	-	10	<i>Ulva pseudocurvata</i>	גידול בתנאי מעבדה. תנאי אור שונים הדמיה לספקטרום שמגיע למים עמוקים.
Korzen et al. 2016 ¹²⁴	-	11.7% 16.8%	נובמבר אוגוסט	נובמבר: 25.3 אוגוסט: 30.2	<i>Ulva rigida</i>	גידול בים (3 ק"מ ממכמורת) צמוד לכלובי דגים.

2.3.10 משטרי זרימה ואורור

באזורים שונים בים שוררים תנאים שונים של זרימה עקב זרמים וגלים, תנאי עומק שונים ועוד. נמצא כי לפרמטרים אלה השפעה על גידול מאקרו-אצות (כולל *Ulva* כמובן). בתנאים של ריכוזי נוטריינטים נמוכים, ספיגת הנוטריינטים דרך שטח הפנים של האצה הופכת להיות מוגבלת-דיפוזיה (כלומר הספיגה הרבה יותר מהירה מהקצב שבו ריכוז הנוטריינטים באזור שטח הפנים "מתאושש"). זרימת מים על פני השטח של האצה מביאה נזל מה-ממאגר המים, וכך מבטלת את אפקט ההגבלה. מסתבר שאורור חשוב אך ורק בהקשר של שיפור דיפוזיית נוטריינטים, ואינו חשוב בהקשר של פינוי חמצן.¹⁰⁴

2.3.11 פלורה מיקרוביאלית

בשנים האחרונות מובנת יותר ויותר החשיבות של אוכלוסיית החיידקים הסימביוטיים המצויים על שטח פני האצה. בעבודות שבוצעו ב-*Ulva* נמצא כי אוכלוסיית החיידקים הנ"ל (ובפרט שלושה זנים עיקריים) מקיימת תקשורת באמצעות מערכות quorum sensing (המשמשות בעיקר לתקשורת בין מינים חיידקיים) עם האצה, ומשפיעה חזק מאוד על פאזת הגידול של האצה.¹²⁵ לכך יש משמעות גדולה בכל הקשור לייצור של חומרי טבע שונים (Nutraceuticals) מאצת ה-*Ulva*. כלומר, מעבר להרכב הכימי של מי הים, יש להביא בחשבון גם את אוכלוסיות החיידקים המצויות שם.

2.4 פוטוסינתזה במאקרו-אצה והערכת "quantum yield"

מאקרו-אצות נחשבות לאורגניזם יעיל מאוד פוטו-סינטטית,⁴ ולכן מדידות פוטוסינתזה עשויות להיות אינדיקטור טוב למצב האצה. ניתן לקשור זאת גם לתנאי ההסתגלות של היצורים הפוטו-סינטטיים לתנאי מחיה שונים.¹²⁶ בנוסף לכך, נמצא כבר בעבר (1983) כי קצב הפוטוסינתזה של *Ulva sp.* נשאר עקבי-כתלות בריכוז המים, ולמעשה כל עוד התכולה אינה יורדת מ-70%. כאשר תכולת המים יורדת גם קצב הפוטוסינתזה יורד עד לרמה אפסית כשתכולת המים היא מתחת ל-35%. ריכוז זה הוא נגזרת של אזור גידול האצה בעמודת המים (שמשפיע על חשיפה/אי-חשיפה לאוויר), ולכן האצה מגיבה בהתאם ותציג נטו פוטוסינתזה חיובית ותכולת פחמן במצב "אופטימלי" ללא חשיפה לאוויר.¹²⁷

מתוך הקביעה של הפלורוסנציה של הכלורופיל *Ulva*, לפני ואחרי פלאש אור סטורטיבי, ניתן לחשב את ערך ה-QY "quantum yield" של הפוטוסינתזה באותם תנאים, ומקבלים את הערך הנע בין 0 מינימום, ל-1 מקסימום. יעילות התהליך של QY היא למעשה הסיכוי של אלקטרון מוקרן שנבלע במערכת הפוטו-סינטטית ליצור ריאקציה פוטו-כימית (תגובה פלורוסנצית), כלומר ריאקציה פורייה בעוד ששאר האלקטרונים יתבזבוזו כחום. כאשר מרכזי ריאקציה חסומים, נקבל פלורוסנציה גבוהה (כלומר האתרים הם חסומים), וערך ה-QY יהיה 0, ואילו כאשר העלים מוחשכים ונקרין פולס תאורה מינימלי (נמוך) נקבל ערך מקסימלי במדד QY, שהוא למעשה מדד ה"יעילות" המקסימלית בעלים מוחשכים (תחת "measuring light"). ערכים מקסימליים שדווחו בספרות למדד זה בצמחים הם בטווחי ה-0.78-0.82,¹²⁸ לעומת מדידות על *Ulva lactuca* שגידלו בבריכות, שהניבו ערכים מקסימליים של 0.7.¹²⁹ יצוין שמכשיר PAM (pulses-amplitude modulation) שגידלו

משמש למטרות מגוונות במחקר בתחום מדידות הפוטוסינתזה, מאחר שהוא אינדיקציה לתהליכים הפוטו-כימיים בצמח/האצה הנבדקת, כפי שתואר בספרות בשנת 1990,¹³⁰ גם במחקרים על מאקרו-אצה *Ulva*.¹²⁶

2.5 שיטות לגידול אצות

2.5.1 גידול בים - קרוב לחוף, ורחוק מהחוף

גידול אצות בים יכול להתבצע או קרוב לחוף או רחוק ממנו, כאשר בגידולים קרובים לחוף קצירת האצות מתבצעת בצורה ידנית והיא למעשה השיטה העתיקה והמסורתית ביותר המוחלפת לאט ככל שפוחו וקודמו טכניקות מתקדמות יותר.¹³¹ שיטות מסורתיות אלו נהוגות בעיקר באזורי גאות ושפל, ובתשתית פשוטה הכוללת קיבוע מקלות בקרקעית עם חוטי רשת הקשורים ביניהם שמחזיקים מיני מאקרו-אצות, כמו בזניבר, ובהיקפים גדולים יותר באירלנד, בתשתיות מתקדמות יותר הכוללות מיכון קצירה מתקדם.¹³² גידולים של מאקרו-אצות קרוב לחוף נפוצים גם בצ'ילה, יפן וסין,⁹⁴ אך תפיסה זו הוגבלה בארה"ב ומספר מדינות באירופה בשל רגולציה.¹³⁴

גידולים רחוקים מהחוף (בים הפתוח) מתבצעים במים הטריטוריאליים או הכלכליים של מדינה,¹³⁴ והם דורשים אופרציה מורכבת של תכנון, רישוי ובניית תשתית גידול, כגון כלובים צפים או מקובעים הנקראים גם חוות גידול בצורה הנדסית מותאמת לתנאים האקלימיים ולמין האצה. החיסרון בגידול בלב ים הוא בכך שהאצות עלולות להיות מוגבלות בדשן,¹³⁵ ובנוסף לכך השונות בין אתרי הגידול כוללת חוסר יכולת לבקר את התנאים בחווה באופן רציף.¹²⁴ יתרון משמעותי הוא לגודל השטחים העצומים שבהם ניתן לגדל את האצות אשר פשוט צפות במים ומתפשטות בשטחי הגידול המגיעים לגדלים עצומים של עד 40,000 דונם.¹³⁶ גידולים רחוק מהחוף נבחנו בהצלחה עם מערכת ימית בצורה טבעית לגידול האצה *Laminaria* בים הצפוני על ידי גרמניה ואופיינו בעלויות גבוהות.^{44,137,138}

2.5.2 גידול בבריכות ומכלים ביבשה

ניתן לגדל אצות בשתי שיטות עיקריות ופופולריות: האחת, בבריכות יבשתיות דמויות מסלול-מירוץ (raceway ponds) או בריכה עגולה, בדרך כלל בשילוב של מכשיר משוטה לערבול המים (paddle wheel).⁷³ והשנייה היא במכלים (ponds/tanks)¹⁷ עם בעבוע אוויר ו-CO₂ לסירוגין. בשיטות אלו התאורה לתהליכי הפוטוסינתזה מסופקת על ידי השמש באופן טבעי ולא נשלט, ובהתאם לעונתיות, והן מתאימות לגידול אצות בקנה מידה קטן, בינוני וגדול לצורך מסחר.

גידול בבריכות יכול להגיע לנפח מדיום של מיליון ליטר על שטח הגדול מ-200 הקטר, לעומת גידול במכלים אשר לרוב עמוקים יותר מהבריכות, אולם נפח המים ודרישת השטח הקרקעי קטנים משמעותית. ערבוב המים בבריכות מאפשר לאצות חשיפה שווה לאור. קצבי גידול גבוהים ואחידים מושגים באמצעות גלגלי דוושות אשר מסתובב ("paddle wheels") שנמצאו כאמצעי הערבול הטוב ביותר לגידול בבריכות, במיוחד עם יתרון לגודל הקוטר, כאשר הגידול מוגבל למספר מינים של מיקרו-אצות, (מינים העיקריים: *Spirulina*,

Haematococcus, Daniella salina) אך עם יתרון בעלויות כספיות לעומת גידול בריאקטורים סגורים. הקמתן והפעלתן של בריכות גידול כאלו מוגבלות לאזורים ולתנאים אקלימיים טרופיים וסוב-טרופיים המאופיינים בכמויות משקעים לזמן מוגבל בשנה, ועננות נמוכה.^{139,140}

חסרונות עיקריים לגידול בבריכות הם אפשרות להמלחה או דילול המים, ושינוי בהרכב היונים בעקבות גשמים או התאדות. כמו כן חוסר בתנאים אופטימליים ושליטה בהם שעשויים להשתנות בעקבות שינויי טמפרטורה במי הגידול, בשילוב קרינה חזקה שעלולים להפעיל "סטריס" על האצות, ולפגוע בקצב הפוטוסינתזה והגדילה. חיסרון נוסף של המערכת הפתוחה הוא שכמעט ולא אפשרי למנוע חדירה של זיהומים שונים לבריכות אלו, כגון וירוסים, חיידקים בקטריות ואצות אחרות,¹⁴⁰ מה שמגביל את מיני האצות שניתן לגדל בבריכות עם תנאים קיצוניים מסוג זה.⁵¹

2.5.3 פוטו-ביו-ריאקטור לגידול מיקרו ומאקרו-אצות על פי מחקרים קודמים

פוטו-ביו-ריאקטור (באנגלית Photobioreactors - "PBRs") הם מערכות גידול יבשתיות עבור מיקרו או מאקרו-אצות עם מספר יתרונות לעומת גידול בבריכות. מערכות אלו בדרך כלל סגורות לחלוטין או כמעט לגמרי, וכוללות תאורה מלאכותית המכוונת לכיוון ריאקטור/האצות והן באמצעות נורות לד חסכוניות בחשמל.¹⁴¹ לריאקטור מערכות שליטה רבות השולטות על ערבוב הנוזל, בקרת הטמפרטורה של מדיום הגידול, ערך pH באמצעות ממשק החלפת גזים (פעפוע גז CO₂ לשם פחמן אי-אורגאני, והסרה של O₂), ואף שליטה על מתן חומרי הזנה מומסים. פוטו-ביו-ריאקטור משמש כלי לסביבה נקייה ותירבות בתנאים מבוקרים, שהוא יתרון מובהק הנחוץ לצורך גידול וייצור מוצרים "בעלי ערך" (High value), וביצועים חוזרים של bioprocesses.¹⁴² בזכות ממשקי השליטה והבקרה ניתן לבצע אופטימיזציה במערכת, ולגדל בה מאקרו-אצות לתשואות גבוהות בגידול וגטטיבי בלי חסמי העונתיות הקיימים בסביבה הטבעית שלהן.¹⁴³ על כל פנים, ריאקטור הגידול חייב להיות שקוף למעבר האור מאחר שהאור עשוי להגביל את גדילת האצות, וזה צריך להיות מסופק על פי מחזור זמן קבוע ומוגדר "Photoperiod", (כיוון שעודף אור עלול להביא ל-photo inhibition ולהזיק לאצה)¹⁴² למעט "outdoors PBRs" אשר ניצבים מחוץ למבנה ומוארים מעוצמת השמש הטבעית.¹⁴⁴

הסירקולציה של האצות במים חשובה מאוד בריאקטורים שכן היא מאפשרת הגעת תאורה מוסתת ואופטימלית לכלל האצות, ואף טמפ' וערך pH אחידים במדיום הגידול המשפיעים על תהליכי הפוטוסינתזה וחילופי הגזים.¹⁴⁵⁻¹⁴⁷ פוטו-ביו ריאקטורים קיימים במספר תצורות הנדסיות ובעיצובים שונים בהתאם למין האצה והצרכים השונים והמשתנים של המגדל/חוקר (Airlift, tubular, bubble-column, stirred tank, Flat) והצרכים השונים והמשתנים של המגדל/חוקר (plate, Vertical-column photo bioreactors).^{51,142,147}

ריאקטורים מסוג "Bubble columns and airlift" אף הוכחו כיעילים מאוד עבור גידול מיקרו-אצות בקנה מידה גדול,^{148,149} שכן צנרת גידול של ריאקטור שכזה יכולה להגיע לאורך של ק"מ ספורים. ניתן גם לגדל מיקרו ומאקרו-אצות בשרוולים, כלומר מין שקיות תלויות בצורה וורטיקלית לאורך תשתית יבשתית. זו מערכת

חצי-סגורה או סגורה לחלוטין המאפשרת שליטה על תנאי הגידול עם סיכון נמוך לזיהומים. שרוולים אלו מכילים נפח שבין עשרות למאות ליטרים, ובהם מבעבעים חמצן ופחמן דו חמצני לסירוגין.

2.6 סיכום סקירת ספרות – פערי ידע

גידול אצות בסביבה ימית הוא תהליך מורכב שבו פועלים יחד כל הפרמטרים ויוצרים אפקטים המשפיעים עם המטבוליזם של האצה. בגידולם ע"ג היבשה ישנם שיקולים רבים בבחירת סוג מערכת הגידול, ובתוכם הפקטורים החשובים מאוד הם הביולוגיה והמין של האצה וכמו כן מטרות הגידול. אחד מסוגי מערכות הגידול הללו (PBR) משמש ככלי תעשייתי לגידול שבו ניתן לבצע סימולציות גידול שונות לאצות, אך רוב השימושים שלו עד כה היו עבור מיקרו-אצות והרבה פחות עבור מאקרו-אצות – ספציפית ל *Ulva*^{150,151} בזמן תחילת המחקר לא נמצא מחקרים על PBR עבור סימולציות של גידול אצות ים בים פתוח.

גידול בים מתבסס בעיקרו על תנאי שטח קיימים ולא על מתן תנאים אופטימליים ומשופרים כפי שנהוג להעמיד בתעשיית האצות (מוצרים "בעלי ערך גבוה"). מכך נובע שישנם ריאקטורים לגידול, אך אינם משמשים עבור חיזוי ותפוקה (בנוסף לקושי שבביצוע ניסויים במרחב הימי עבור גידול אצות). לפיכך, קיימים פערי ידע מסוימים לחיזוי מהו פוטנציאל הגידול/התפוקה של אצות במקומות רחוקים מהחוף שבמזרח הים התיכון. מגוון המיקרו-סביבות שניתן למצוא בחופי ישראל הוא רב ביותר, ויחד עם השינויים העונתיים בשל עונות השנה (חורף, אביב, קיץ) השונות ומשרעת התנאים הגדולה, (שינויים כמעט ברמה תלת-חודשית). ישנו קושי לתת הגדרה ברורה וקבועה לשאלה היכן נמצא המקום הגיאוגרפי שפרודוקטיבי ביותר לאצה (רחוק מהחוף). בנוסף לפערים אלו, לא נבחנה האופציה לגדל את האצות על פי ריכוזי הדשן הגבוהים (יחסית) אשר נמצאים דווקא בעומק עמודת המים והשפעתם על קצבי הגידול ופרמטרים פיסולוגיים נוספים. לתת כן בולטים שאלות המחקר ופערי ידע.

2.7 הפתרון המוצע

על מנת לבצע סימולציה של תנאי ים בתנאי במעבדה נבחר להשתמש בפרוטו-ביוריאקטור בראש ובראשונה מאחר שהוא יאפשר שליטה בפרמטרי גידול שונים, כגון: טמפרטורת מים, קצב זרימת המים, שליטה על פוטופיריודה (photoperiod), על עוצמה וספקטרום של התאורה, וכן על ריכוז חמצן מומס במדיום הגידול. הודות לאפשרות לשלוט בפרמטרים השונים נוכל לבצע סימולציה במעבדה שקרובה ככל האפשר לתנאים ספציפיים המעניינים אותנו, כלומר אלו הקיימים במזרח הים התיכון.

הכלי שיפותח הוא PBR מסוג "continuous flow Photobioreactors" לגידול מתמשך של מאקרו-אצה ממין *Ulva* אשר יוצב במעבדה. במערכת ניתן להגדיר וליצור מספר רב של תנאים שונים ולבחון בכל ניסוי את השפעתם על האצה, ובכך לחזות את ביצועי הצמיחה בגידול וגטיבי מתמשך ליצעים של האצה *Ulva*. תפעול התנאים לסביבת הגידול בריאקטור ויצירתם נעשו על פי נתונים קלימטולוגיים, פיזיקליים וכמויות דשנים

המאפיינים את הים התיכון שנלקחו מהשירות המטראולוגי הישראלי וממכון המחקר חקר ימים ואגמים. לכן, הריאקטור שימש לחיזוי ולא לגידול אופטימלי.

3. הליך המחקר

3.1 מטרות המחקר

מטרתו העיקרית של המחקר היא פיתוח מערכת גידול מעבדתית (Photobioreactors) עבור מאקרו אצות לצורך סימולציה של פרמטרים מסוימים של גידול אצות בים פתוח. המערכת שתשמש כלי לביצוע מחקר באמצעות ביצוע הדמיה רציפה, לכן באמצעותה נבחן ונבין את השפעתם של תנאים סביבתיים, לפי עונה על מגוון פרמטרים פיסולוגיים.

מטרות ספציפיות:

1. אפיון ריאקטור וחלקיו לצורך פיתוחו ובנייתו.
2. הגדרת השיטה לביצוע סימולציות ניסיוניות של גידול אצות ים בתנאי מעבדה.
3. הגדרת אזורי בים שעבור יבוצעו הסימולציות ותנאים, כולל סט התנאים שבהם לביצוע ניסויי החיזוי.
4. התאמת ריכוז החנקן הפנימי באצות לסף מינימלי בטרם התחלת הניסויים.
5. בחינת המערכת הפוטוסינתטית לאצות שיגדלו במעבדה.
6. בחינת השפעת התנאים השונים על קצבי גידול וההרכב הביו-כימי לרבות ריכוז חלבון.

3.2 שאלת המחקר וההשערה

3.2.1 שאלת המחקר

כיום לא ידוע היכן ניתן לגדל את המאקרו-אצה *Ulva sp.*, ומהי התפוקה של ביומסה מהאצה בגידול באזור הפלאגי של הים התיכון, אשר ידוע כדל בחומרי הזנה (oligotrophic) שהכרחיים לגידול. שאלת המחקר היא: מהם קצבי הגידול של האצות בים תיכון, בתנאי שהנוטרינטים מסופקים מהעומק?

3.2.2 השערת המחקר

השערת המחקר שבעזרת ביצוע סימולציות בראקטור במעבדה נוכל ללמוד איך התנאים סביבתיים מסוימים (ריכוזי חנקן, זרחן, מליחות, שטף ומשך קרינה, וערכי טמפ') השוררים בים התיכון בעונות שונות משפיעים על קצב גידול ביומסה של מאקרו-אצה מהמין *Ulva sp.* ועל ההרכב הביוכימי שלה.

3.3 שיטות וחומרים

3.4 פוטו-ביו-ריאקטור – מערכת לגידול מאקרו-אצות בסימולציות

מערכת פוטו-ביו ריאקטור מאפשרת לגדל מין אחד ספציפי של מאקרו-אצות לגידול ארוך ומתמשך בכל אחד מחמשת תאי הריאקטור (ראה איור מס' 5) המשמשים כתאי גידול. כל תא כזה מכיל נפח מים של 1 ליטר קולכות-ראה איור מס' 8). תאים אלו הם חלק מהמערכת (ראה איור מס' 11). במהלך הניסויים בפוטו-ביו

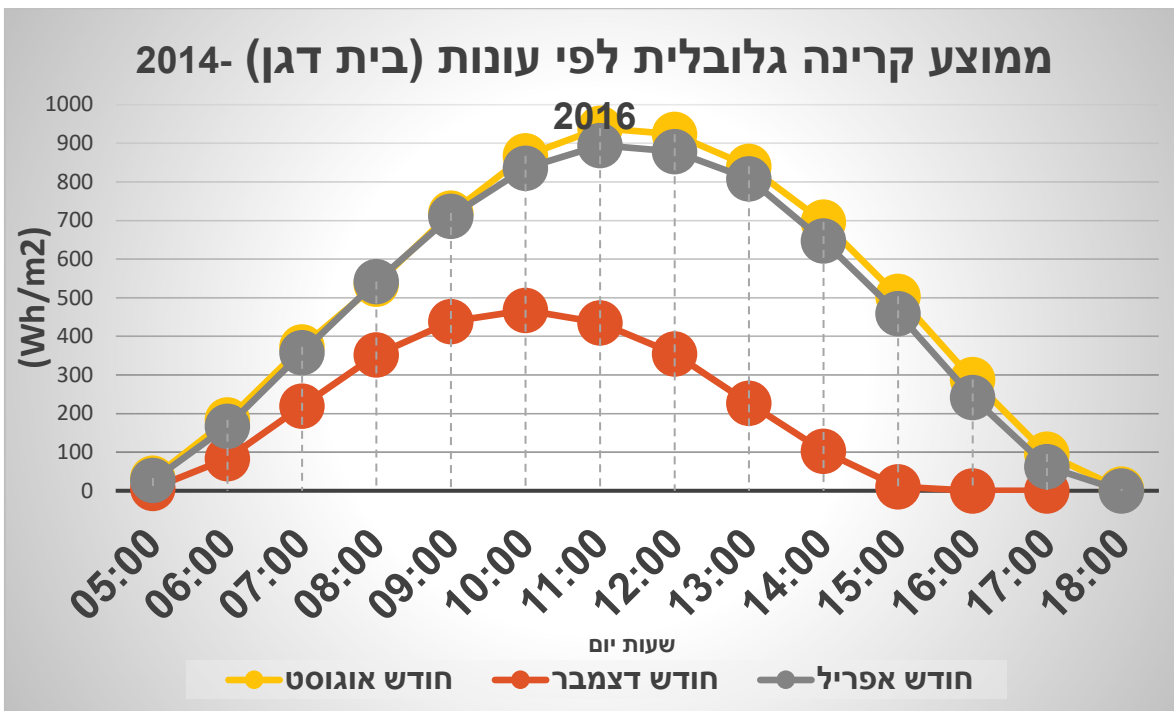
ריאקטור ובסיומם, ניתן לנתח את תוצאות קצבי הגדילה של האצות (משקל ביומסה DW-dry weight) לצורך מתן חיזוי לגבי השאלה מה מתפוקה של ביומסה בים התיכון לשימושים של מזון וביו-דלקים ברעיון הביו-ריפיינרי. המערכת תוכננה ונבנתה כך, שתוכל ליצר משרעת נרחבת של תנאים לצורך ביצוע סימולציות ע"פ תנאי עונה. התאלוסיים שנבחנו ונבחר יושמו בתוך 5 תאי גידול נפרדים שבהם האצות נעות בשל תחלופת מים נשלטת וקבועה. על גבי תאי הקולבות מוקרנת מלמעלה תאורה מלאכותית בשעות קבועות ובמצב עמעם קבוע. בתום הסימולציה נעשה קציר האצות ידנית מתוך התאים.

3.4.1 תאורה בפוטו-ביו ריאקטור

גידול האצות בתאים ופעילות פוטו-סינטטית התאפשרו באמצעות מנורת גידול מסוג metal halide lamp של חברת Solis Tek בהספק של 600 watt - (V 220) אשר מספקת אור יציב בזמן פעולה. מקור אור זה נבחר מאחר שלא היה סימולטור שמש נשלט לתנאים ועוצמות שונים. המנורה חוברת לבית מנורה המספק לה מתח עם רפלקטור מקומר שנוטה כלפי מטה לכיוון תאי הגידול. במערכת פוטו-ביו ריאקטור יש הגעה משופרת של אור לתאים. היחס שבין שטח הפנים לנפח הוא גדול יותר בפוטו ביו ריאקטור, כמו כן ניתן לשלוט בעוצמת האור המוקרנת על מנת להתאימה באופן יחסי לסימולציות ספציפיות במעבדה המדמות תנאי עונות שונות. השליטה בעוצמה נעשית בעזרת דימר המשנק, וקיצור/הארכת השרשרת אשר עליה תלויה מנורת הגידול מעל התאים. ערכי רמת התאורה שנבחרו לסימולציות היו שונות, וארכו משך זמן שאינו זהה, היו בהתאם לערכים שנמדדו וחושבו "הערכת ממוצע קרינה". להרחבה ניתן לעיין באיור מס' 4, המציג את השתנות הערכים בממוצע לעונות השונות, כפי שנקלטו בתחנת השירות המטאורולוגי בבית דגן, בהסברים ובנוסחאות.

3.4.2 הערכת הקרינה הממוצעת בחודשים שונים בחופי ישראל

איור 4 לעיל משקף את נתוני הקרינה הממוצעת עבור שעה ביחידות $\text{watt}\cdot\text{h}/\text{m}^2$ כפי שנתקבלו בתחנת המדידה הנמצאת בבית דגן, עבור שלושת החודשים: אפריל, אוגוסט, דצמבר. הנתונים המוצגים חושבו לפי ממוצע הקרינה החודשי בשנים 2014-2016 ומוצגים על פי ימים. סכום האינטגרל ($\text{watt}\cdot\text{h}/\text{m}^2$ per day) עבור חודש אפריל עמד על 6634.84; עבור חודש אוגוסט 7005.47 ועבור חודש דצמבר כ-2698.36.



איור 4: הערכת ממוצע קרינה יומי עבור 3 חודשים.

מקור - אתר השירות המטאורולוגי: <https://ims.data.gov.il/he/ims/6>

(Conversion value) = $\mu\text{mol of photons } m^{-2} s^{-1}$	נוסחה מס' 1 המרה
$\text{Watt}/m^2 * 4.59$	

הנוסחה מבצעת המרה של מקור קרינה נורת "metal halide מ W/m2" ל photons.

טבלה מס' 3: חישוב קרינה לסימולציות

חשוב:	חודש סימולציה
$268.78w * 4.59 =$ $1233.70 \mu\text{mol of photons } m^{-2} s^{-1}$	דצמבר
$538.54w * 4.59 =$ $2471.899 \mu\text{mol of photons } m^{-2} s^{-1}$	אוגוסט
$510.37w * 4.59$ $= 2342.598 \mu\text{mol of photons } m^{-2} s^{-1}$	אפריל

*על מנת להמיר ערכו של כל 1 W/m^2 מ-HPMH לייחודות פוטון, הוכפלו סך יחידות הוואט בערך יחידות המרה של 4.59. כל ההמרות בוצעו על פי האתר: http://www.egc.com/useful_info_lighting.php

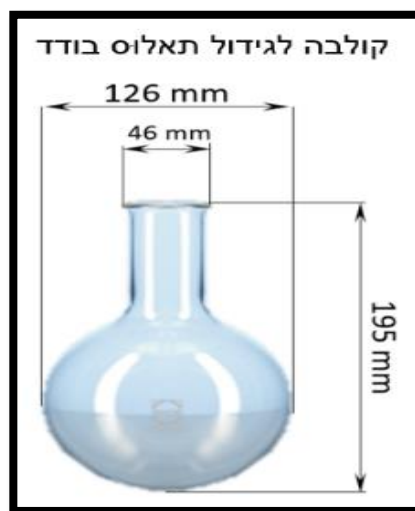
מדידות קרינת השמש הכוללנית נעשות באמצעות פירנומטר אשר מוצב על משטח אופקי באזור תחנת השירות המטאורולוגי בבית דגן. לעומתן, תוצאות מדידות ה-PAR בריאקטור מייצגות ערך נמוך (בהשוואה להמרות על פי החודשים) מאחר שהאינטגרל שלו סוכם את כל טווח ה-nm, לעומת סכמת ערכים קטנה בהרבה יותר במכשיר ה-LI COR (400-700 nm).

3.4.3 פירוט מדידות תאורה

- לצורך אפיון התאורה המוקרנת על גבי תאי האצות (אור פולי כרומטי) בוצעו ארבע מדידות תאורה:
1. מדידה באמצעות מכשיר ספקטרו-רדיומטר, לאפיון פליטות (עקומי פליטה ספקטראליים) על פי מצבי בורר התאורה השונים, ביחידות מידה של Lux. הערך המקסימלי האפשרי הוא 1 (ובספקטרום רציף).
 2. מדידות באמצעות מכשיר ספקטרו-מטר למדידות אבסולוטיות לפי מקדם ביו-כימי, של כמות watts למטר מרובע לשנייה, על פי אורך גל nm לכל מצבי בורר התאורה השונים. יחידות המידה מתקבלות ב- W/m^2 .
 3. מדידות באמצעות מכשיר ספקטרו-מטר המודד את היחס של Watt לכל אורך גל nm.
 4. מדידות עוצמת תאורה בתא הגידול ($\mu\text{M of photons m}^{-2} \text{ s}^{-1}$).

3.4.4 תאי גידול

בריאקטור חמישה תאי גידול, שכל אחד נקרא בשם "קולבה" (ראה איור מס' 5), וצורתו עגולה וכדורית. הקולבה היא מִקְל עשוי זכוכית שקופה, מין בקבוק רתיחה עם תחתית מעוגלת שנפחה המקסימלי הוא 1.1 ליטר. כל תא סגור בפקק גומי אדום אלסטי מעט, אשר דרכו עוברים שני צינורות פוליאתילן שחורים בקוטר פנימי של שישה מ"מ. תפקיד צינור אחד הוא להזרים מים לתא באופן תמידי, ותפקיד הצינור השני הוא לרוקן מים באופן תמידי, זאת כל זמן שהמערכת עובדת. ממדיו של תא הגידול הם 126 מ"מ רוחב גולה מקסימלי, גובה כולל 195 מ"מ, ועובי הזכוכית ~1.5 מ"מ.



איור 5: תא גידול יחיד בריאקטור

3.4.5 תנאים פיזיאוולוגיים

הקולבות נמצאות בתוך תא מתחת למנורת הגידול. המשטח של התחתית ודפנות קופסה זו מצופים בציפוי רפלקטיבי המחזיר 100% מקרינת מנורת הגידול, זאת כדי להגדיל את יחס האנרגיה המוחזרת חזרה מפני השטח והדפנות לסכום הכללי של האנרגיה המכה בפני השטח (תאים), וכך גדלה סך כל הקרינה הנקלטת על ידי הקולבות. במצב זה ניתן להניח, כי כל מרכזי הריאקציה של האצות מעורערים באור חוזר (כאשר הנורה דולקת). בפעילות הריאקטור מתקיימים פכפוך מים בצורה קבועה (Aeration), וזאת בשל חירור צנרת המחוברת למשאבה. כאשר המשאבה פועלת חלק מהמים ניתזים בחזרה אל תוך המכל התחתון, וכך חלקם גורמים להוספת חמצן מומס למדיום. המים בקולבה גורמים למשטר סירקולציה. היות שהמערכת של הפוטו-ביו ריאקטור סגורה, האידיוי הוא זניח ביותר והדבר מסייע להקטנת התנודתיות במליחות, וכך מונע עיכוב בגידול של האצות.

3.5 תיאור מערך הניסויים במחקר

מערך הניסויים המתוארים להלן בוצעו בפוטו-ביו ריאקטור שפותח ונבנה לצורך המחקר הנוכחי, והאצות שבהן נעשה שימוש לניסויים הן מאקרו-אצה מסוג *Ulva sp.* האצות שנבחרו היו מאותו מלאי, מאותה בריכת גידול ונלקחו אלה שנראו חזקות ללא קרעים ועם מעט חורים, אם בכלל. שיטת הגידול הייתה גידול מנתי (מחזורי), שבו לאחר כל סימולציה נקצרה כל הביומסה מהתאים, והניסוישלאחריו התחיל מתרבית חדשה (thallus) שחולקה לחמש חתיכות (כמספר תאי הגידול). שיטה זאת מתאימה לגידול אצות הרגישות לזיהומים, ומאפשרת לבצע ניקוי וחיטוי של הפוטו-ביו ריאקטור בין מחזור גידול למשנהו.

המשתנה התלוי היו הדשנים הבאים: NO_3^- , PO_4^{3-} , ערך טמפ' ומליחות, המשתנה הבלתי תלוי היה שינוי משקלי בביומסה של כל אצה (מתא מס' 1-5) ביחידות משקל רטוב.

3.5.1 תקופת אקלום

כחלק מניסויי גידול אצות באמצעות סימולציות יש להבין את רעיון האינטראקציה של תאלוס של *Ulva* עם הנוטריינטים, ואת אגירת החנקן בתא, שכן בהימצאות האצה במדיום ללא ריכוז חנקן (תהליך של "הרעבת אצות") אזי אחוז ריכוזו משפיע על קצבי גדילה ומשך זמנו עד לנקודה הקריטית להמשך גידול (N_c). נקודה קריטית זו (critical tissue N content) הוערכה לכמות חנקן ב *Ulva*, לנמוכה מערך 2.17% (DW)¹⁵², אך בספרות נמצא כי הצליחו לגדל מין זה גם מערך התחלתי הנע בין 1.4%~1.08¹⁰⁸ בעוד שהערך החנקן המקסימלי (N_{max}) יכול להגיע ל-5.78% – ערך עודף עבור יסוד החנקן.¹⁵²

סקירת מחקרים קודמים על ריכוז חנקן בתא של האצה *Ulva lactuca* לאחר תקופת הרעבה (שהות במדיום ללא חנקן) הראתה ירידה מערך חנקן התחלתי (ממשקל יבש) של 4.15% ל-1.16% לאחר 24 ימים, כאשר עיקר הירידה מתרחשת בין הימים 7 - 10 הראשונים.¹⁵³ עיקר הירידה בערך החנקן שנצפתה בששת ימי האקלום הראשונים ירדה מערך ההתחלתי של 4.15 ל-2.2% N of DW¹⁵³, בנוסף נמצא שבתקופת הרעבה תכולת חנקן באצה יכולה לתמוך בגדילת האצה לפרק זמן הנע בין 6-9 ימים מקסימום.¹⁰⁷

לפיכך, במחקר זה בחרנו לבצע אקלום לאצות לפני ניסויי סימולציה אשר עמדה על שבעה ימים מלאים (כערך סטנדרטי). לצורך תהליך האקלום נלקחו בין 6 ל-8 תאלוסים (Thallus) גדולים, ירוקים ובריאיים של *Ulva* מחוף רידינג בתל-אביב, ונשטפו במים מזוקקים לצורך הורדת אפיפיטים ומשקעים. התאלוסים הוכנסו לתוך ארלנמייר בנפח 1.5 ליטר ושהו במדיום סינטטי (1.5 ליטר) שהוכן מחדש לכל ניסוי, והכיל מים מזוקקים (distilled water) ומלח ים שהומס כ 38 ppt (Red Sea Salt, Cheddar UK). המסת המלח גרמה לנוכחות מועטה מאוד של נוטריינטיים: NO_3^- , NH_4^+ , NO_2^- , PO_4 , וסיליקט, שכולם נמדדו לאחר המסת המלח ברמות שונות (פירוט בטבלה מס' 7). כמו כן לקיום יסודות של מינרלים בערכים מינימליים (ראה איור 10: יסודות נלווים להמסת המלח) וגם בהמשך, במהלך ביצוע הסימולציה.

קיבענו בקבוק מעבדה שקוף מזכוכית אל מול חלון לקבלת תאורה שמש טבעית (שימוש במים מזוקקים תרם לשמירה על מקדם דעיכה נמוך של האור במי התאים), ואליו חוברה משאבת אוויר עם צינור המזרים אוויר בקרקעית הבקבוק לצורך יצירת תנועה של התאלוסים ומתן חמצן מומס. זרימת האוויר הייתה בנפח של כ-2 ליטר אוויר לדקה במשך כל תקופת האקלום. טמפ' המדיום הייתה קבועה במליחות של 38 PPT (התנאים היו זהים בכל ניסויי האקלום). לפרוט סוגי המעקב/מדידות ניטור, בשלבי הניסוי ותדירותם ראה **טבלה מס' 5**.

3.5.2 מערך הסימולציה

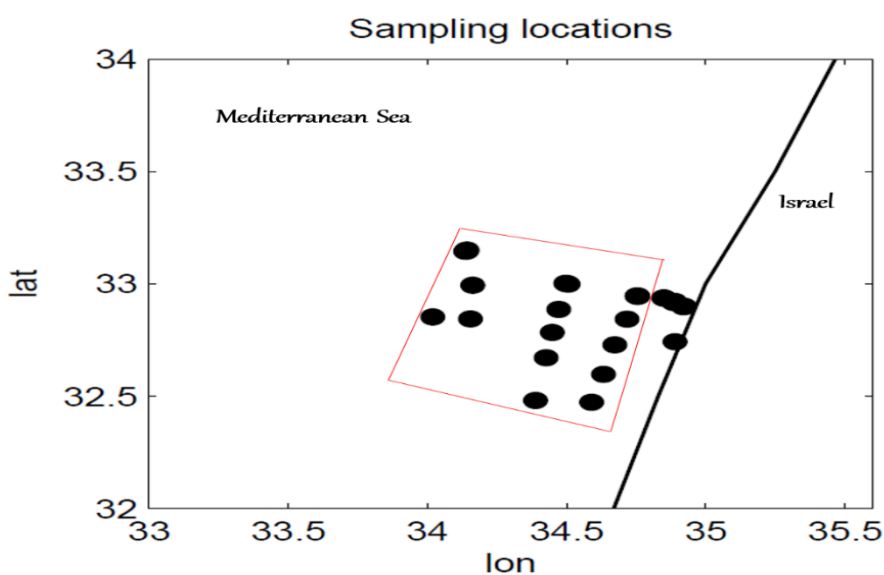
בסימולציה נבחן את קצב גידול האצות במשך 3 ימים. משך זמן זה נבחר משיקולים טכניים - בשל מגבלות גודלם של תאי הגידול, ומגבלות פיסיולוגיות-המנעות משחרור ספורות. בתום תקופת האקלום נלקחו 6-8 תאלוסים גדולים, טריים וירוקים ויובשו בצנטריפוגה למשך כדקה, ולאחר מכן נחתכו לחמש חתיכות בצורת ריבוע שוות עד כמה שניתן כדי לפצות על הבדלים ביולוגיים פוטנציאליים. בתחילת הסימולציה ניתן אך ורק פולס אחד של דשן בכמות ובהתאם לסוג הסימולציה. במהלך הסימולציה זרימת המים לתאים (ומהתאים) לא פסקה. בתום שלושת ימי הניסוי נקצרו האצות מהתאים, יובשו למשך כדקה בצנטריפוגה, נשקלו וצולמו בדפי שקף, וזאת כדי לבחון אם התרחש איבוד במשקל הביומסה. לאיור והסבר על מיקום הדיגום של הנתונים (משתנה תלוי) לסימולציות המדמות עונת האביב ראה **איור מס' 6**. לאיור והסבר על מיקום הדיגום של הנתונים (משתנה תלוי) לסימולציות המדמות עונות קיץ וחורף, לרבות מיקום הדיגום במרחב ראה **איור מס' 7**.



איור 6 משקף את האתר בו נדגמו מי הים (בריכת מי הקירור בתחנת הכוח חח"י רידינג – תל-אביב) בחודש אפריל. תוצאות הדיגום מפורטים בטבלה מספר 3.

איור 6: אתר לנתונים עבור ביצוע סימולציית תנאי אביב (חודש אפריל).
 מקור: <https://maps.google.com/>

איור 7 מציג את מיקומי הנקודות בפוליגון שמייצגות את מיקומם של 14 מדידות דשן אנאורגני. הערכים שבהם נעשה שימוש משקפים ממוצע של נקודות אלו (מהאזור המוצג באדום).



איור 7: אזורי דיגום – סקר רקע 2013.
 מקור: נתוני סימולציות (ריכוז נוטריינטים בתנאי החורף והקיץ) נלקחו מחיא"ל, במסגרת סקר רקע משנת 2013, הפלגה "BSGas01".

3.5.3 תנאי הניסויים

בטבלות 4 ו-5 הבאות מרוכזים כלל הפרמטרים שנבחנו השפעתם על האצות בסימוליות. בטבלה 3 מוצגים הפרמטרים עבור כל סוג סימולציה שבוצעה בפועל בפוטו-ביו ריאקטור. נתוני הדשן לניסויים שמספרם 1 ו-2

המוצגים בטבלה אופיינו בצורה מרחבית, ומייצגים מגמה בעונת החורף, ומגמה בעונת הקיץ. מקור הנתונים: חיא"ל.

טבלה 4: פירוט התנאים האביוטיים במהלך הסימולציות השונות ב-PBR.

מספר ניסוי:	מיקום:	מליחות:	פוספאט μmol	חנקן μmol	עומק מים במטרים:	טמפ':	עונה:	כמות ניסויים:
1	ים תיכון	39.14	0.22	5.82	500-	27.17	קיץ (אוגוסט)	3
2	ים תיכון	39.32	0.26	6.58	460-	19.68	חורף (דצמבר)	3
3	ים תיכון	36	1.93	92.86	מי שטח	21	אביב (אפריל)	2
4	ים תיכון-ניסוי מיוחד ללא חילוף מים	39.32	0.26	6.58	460-	22.23	חורף (דצמבר)	1
5	ניסוי במעבדה.	38	0.19	1.7	-	21-23	ניסוי בסיס לפני סימולציות	-

ערכי התאורה שמוצגים בטבלה 5 משקפים את רמות הקרינה השונות (ע"פ סימולציה) שהתקימו בפועל, בתוך תאי הגידול. באיור מס' 8 נראה תא מואר בתאורה המלאכותית. ערכי השעות שמוצגים בטבלה משקפים את הפעלת התאורה בפועל (ע"פ סוג סימולציה) שהתקימו בפועל. פעילות התאורה בפוטו-ביו ריאקטור התאפשרה בהזנת מתח V220 לנורה Solis Tek, California, US metal halide lamp-600 watt לביצוע סימולציות של תנאי חורף (חודש דצמבר), תנאי קיץ (חודש אוגוסט) ותנאי אביב (חודש אפריל).

טבלה 5: אורך שעות הארה והשכה בפוטו-ביו ריאקטור בזמן סימולציות (כולל רמות תאורה)

מספר ניסוי:	שעות תאורה:	שעות חשכה:	סך שעות תאורה:	מצב פוטונציומטר:	עוצמת תאורה:	עונה:
1	5:00-18:00	18:00-5:00	13	75%	259 PAR μmol of photons $\text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (n=38.72±S.D.) ¹	קיץ (אוגוסט)
2	6:00-16:00	16:00-6:00	10	50%	112 PAR μmol of photons $\text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (n=15.17±S.D.) ¹	חורף (דצמבר)
3	7:00-19:00	19:00-7:00	12	75%	259 PAR μmol of photons $\text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (n=15.17±S.D.) ¹	אביב (אפריל)
4	7:00-17:00	17:00-7:00	10	50%	112 PAR μmol of photons $\text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (n=15.17±S.D.) ¹	חורף (דצמבר) ללא חילוף מים
5	אור שמש טיבעי	-	-	-	Pick at 120 PAR μmol of photons $\text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$	ניסוי בסיס (אקלום)



איור 8: תיעוד מערך של ניסוי גידול

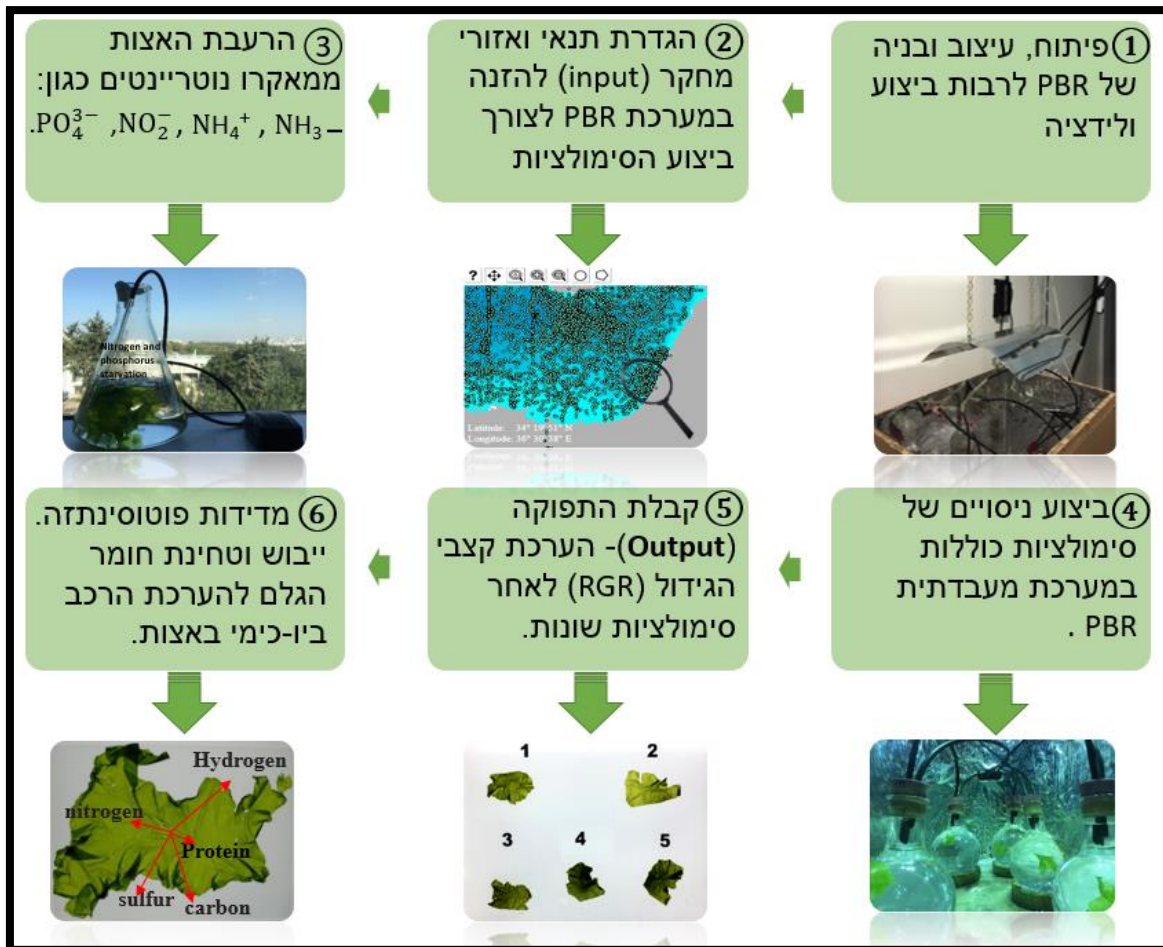
ניטור מגוון פרמטרים בוצע הן בשלבי האקלום והן בשלבי הסימולציה. פרוט לסוג המעקב ולתדירותו בשלבים השונים ניתן לראות בטבלה מס' 6.

טבלה 6: מעקב פרמטרים בניסויים

תדירות	שלב בניסוי	סוג מעקב/מדידה
בהתחלה ובסוף	תנאי אקלום	משקל אצות
תמידי	תנאי אקלום	פעפוע אוויר
לסירוגין	תנאי אקלום	מעקב טמ"פ
ללא	תנאי אקלום	מעקב PH
בהתחלה ובסוף	תנאי סימולציה	משקל אצות
לסירוגין (בהפעלת המשאבה)	תנאי סימולציה	פעפוע אוויר
תמידי	תנאי סימולציה	מעקב טמ"פ
פעמיים	תנאי סימולציה	מעקב PH
פעם אחת (בסוף היום השלישי)	תנאי סימולציה	יעילות פוטוסינתזה

3.6 סיכום מטודולוגיה

תרשים של מהלך המחקר מוצג באיור מס' 9 לעיל. לצורך המחשה האיור חולק ל 6 שלבים שונים, כאשר לאחר סיום פיתוח הריאקטור והגדרת תנאי המחקר, רק הפעולות המתוארות בסעיפים 3-6 חזרו על עצמם.



איור 9: תרשים זרימה במחקר. שלב 1-2 – השלבים הראשוניים של בנייה, פיתוח וביצוע התאמות בטרם הופעלה המערכת עבור ניסויי סימולציה, ולאחר מכן ניתוח נתונים קלימטולוגיים פיזיקליים וביולוגיים לצורך הגדרת מכלול התנאים לשלוש סימולציות עונתיות שונות. (תיאור מפורט של מערכת סימולציות הגידול "PBR" ראה איור מס' 11 בפרק התוצאות. **שלב 3** – אקלום האצות למשך שבועה ימים כסטנדרט, שבהם האצות היו ללא חומרי דשן בטרם הכנסה לריאקטור לביצוע הסימולציות, וזאת כדי לא להתחיל את ניסויי הסימולציה כשהאצות "מלאות" בחנקן. **שלב 4** – העברת האצות לניסויי סימולציה בפוטו-ביו ריאקטור לכחמישה תאים בודדים. **שלב 5** – קבלת תוצאות סופיות לאחר הוצאת האצות כעבור שלושה ימי סימולציה, ושקילת האצות להערכת קצבי הגידול. **שלב 6** – עריכת בדיקת יעילות פוטו-סינטטית, לאחר מכן ביצוע הערכת CHNS.

3.7 מדידות בניסויים

3.7.1 מדידות קצב גידול

מעקב תוצאות הגדילה התאפשר בעזרת הנוסחה (Daily Growth Rate) DGR שבה הוזנו הנתונים לפני תחילת סימולציה ובתום הסימולציה, כפי שנעשו במחקרים קודמים.^{154,155}

$$DGR = \frac{1}{N} \cdot \frac{m_{out} - m_{in}}{m_{in}} \cdot 100\% \quad \text{נוסחה מס' 2:}$$

כאשר, ערך N מייצג את מספר הימים בין שתי מדידות הביומסה; m_{out} מייצג את המשקל הרטוב של האצות (gram of wet weight) אשר נשקלו בתום הסימולציה; m_{in} מייצג את המשקל הרטוב (wet weight) של האצות מיד לפני תחילת הסימולציה. היות ומשקל הביומסה לא נמדד בכל סוף יום, הנתונים שיוצגו (DGR) מיוחסים לסה"כ 3 ימי גידול.

3.7.2 מדידות תאורה

בוצעו שלוש מדידות תאורה כדלקמן:

המדידות בוצעו בכל אחת מחמשת תאי הגידול, מעל תושבות השעם של התאים, ובשלוש זוויות שונות: 0° , 45° ו- 90° מעלות צלזיוס. המדידות נערכו עבור כל הספק אפשרי של המנורה (מצבי הפוטנציומטר הם: 50%, 75%, 100% ו-110%). המדידות של התאורה בוצעו במכשיר Light Sensor logger של חברת LICOR מדגם LI-1500, (PAR-METER LI-COR, Light Sensor, LN, USA) עם סנסור כדורי ותוך בחירת קונפיגורציה "AIR-BALL". המדידות בוצעו בתוך תא הגידול, תיעוד מיקומו של הסנסור בזוויות השונות ניתן לראות באיור מס' 18.

למדידות עם סנסור כדורי יש מספר מטרות: (1) להעריך ברמה מדויקת עד כמה שניתן את עוצמת התאורה אשר מגיעה לתאים כאשר הסנסור של המכשיר (LI-COR, Light Sensor, LN, USA) מכוון בזוויות שונות: 0° , 45° , 90° אשר מדמה מיקום של הקולבות. (2) לבצע מדידה בכל אחת מהזוויות של הסנסור על שלושה מצבי פוטנציומטר. (3) בסך הכול כ-12 ניסויים (50%, 75%, 100% super Lux is addition) לבצע מיצוע לכל תוצאה שמתקבלת בכל אחד מחמשת התאים ($12 \cdot 5 = 60$) (10% of watt- 660w). (4) לבצע מיצוע לכל תוצאה שמתקבלת בכל אחד מחמשת התאים (12*5=60) ולהציגם בגרף. (5) לסקור את הנתונים הכמותיים של כמות מיקרו-מול פוטון למטר מרובע לשנייה, על בסיס גובה הנורה הקיים במערכת כרגע. (6) לקבל החלטה על סמך התוצאות אם להשאיר את משנק התאורה במצב 50%, וכמו כן לזהות את הטווחים הרצויים לסימולציה, ולוודא שקיימת שונות קטנה בין התאים.

(1) מדידות תאורה בוצעו באמצעות מכשיר ספקטרומטר (Stellar Net Inc, Florida, US). (הנתונים הופקו בתוכנות Spectra Wiz spectrometer version 5.33 ו Excel). המכשיר מדד את עוצמת התאורה בריאקטור (W/m^2) והתוצאות שהתקבלו הן ב-Watt ליחס של אורך גל. במכשיר זה בוצעו גם מדידות

נוספות ביחידות מדידה PAR (photo synthetic active radiation) לפי מקדם ביוכימי (מדידות אבסולוטיות) שיחידותיו מוצגות ב- (W/m^2) per nm.

2) מדידות תאורה של עקומי פליטה על פי nano meter בוצעו במכשיר ספקטרו-רדיומטר ידני של חברת upRtek מדגם MK350N (הנתונים הופקו באמצעות התוכנה: uSpectrum). המכשיר מודד ביחידות Lux מדידה אבסולוטית לאורכי הגל בתחום ה-PAR (380-780 nm). הגרפים בתוצאה מראים יחסיות של אורך גל והערך המקסימלי שלו הוא 1 לעומת כל nm. ניתוח התוצאות נעשה באמצעות תוכנה בשם: us spectrum.

3.7.3 ייבוש ושקילות ביומסה

הפרדת הנוזלים שעל גבי האצה בוצעה לאחר הוצאתם מהקולבה באמצעות מכשיר מייבש Spin Drayer (חברת BESWIN, מדגם CE-98/CE-88, סין). האצות הוכנסו לשקיות נפרדות שמוספרו בכל פעם (5-1), והונחו בתוך המייבש אשר מסתובב ויוצר כוח צנטריפוגלי של 2800 סל"ד (סיבובים לדקה). לאחר מכן בוצעה שקילת האצות (FW- fresh Weight) באמצעות משקל מעבדתי (METTLER, Greifensee, Switzerland) מדגם XS105 (TOLEDO) לשקילת האצות עם ערך שגיאה של 0.2 mg.

3.7.4 מדידות פוטוסינתזה

בשלב ראשון בוצע כיוול של רמת התאורה ממכשיר ה-PAM (Actinic lighting 0-11 levels) בבחירת מצב "int. Halogen". אור זה הניב 12 רמות תאורה שונות ($400-700$ nm; $1.6- \mu\text{mol of photons m}^{-2} \text{s}^{-1}$). הכיוול בוצע באמצעות המכשיר "Light Sensor logger" של חברת LI COR מדגם 1500 (ראה גרף כיוול נספח 3).

בשלב שלאחר ביצוע הכיוול בוצעו שאר המדידות במעבדה כאשר הפרמטר הנבדק היה היעילות הפוטו-סינטטית. המדידות נלקחו מיד בתום כל סימולציה בשעות אחר הצהריים. כל חמש האצות נלקחו והוכנסו לחמש צלחות פטרי נפרדות בקוטר 80 מ"מ כל אחת, אשר מולאו במים מאותו הניסוי הספציפי (בכל פעם מחדש). כל צלחת הונחה במרחק סנטימטר וחצי מהסיב האופטי, ובתוכה שהתה האצה ללא תזוזה כאשר היא טבולה במים, במצב מאוזן בצלחת. סיב אופטי של מכשיר זה מניב אור מדידה בגוון אדום, שמקבל קריאה לאחר הפעלת פולסי אור.

עבור כל תאולוס אצה בחנו את מדד QY (quantum yield) באמצעות מתן פולסים של אור אקטיני (AL) בתחום אורכי הגל של 650-670 nm (אדום) כשהוא מכון ממרחק 1.5 cm על מרכז התאולוס בתנאי חושך מלאים בחלל. כל הפולסים של המדידות בוצעו במרווחי זמן קבועים, ובכל 12 רמות שונות של תאורה, החל מ-1.6 ועד לעוצמת קרינה מקסימלית של כ- 1604 ($1.6- \mu\text{mol of photons m}^{-2} \text{s}^{-1}$; 400-700 nm).

היעילות הקוונטית חושבה לפי נוסחה QY של המרת אנרגיה פוטו-כימית במערכת PS2.¹⁵⁶

$$\text{The quantum yield of PS2} = \frac{Fm' - Fv}{Fm'} = \frac{\Delta F}{Fm'}$$

נוסחה מס' 3:

הסברת המשתנים:

Fm – מייצג פלורוסנציה מקסימלית שנוכל לקבל בתנאים מסוימים, כאשר האצה בתנאי חושך (מוגדר גם כ- "F max").

Fv – מייצג את הערך של הפלורוסנציה של המערכת (Variable Fluorescence).

Fm' – מייצג את הפלורוסנציה המקסימלית בתנאי תאורה שונים.

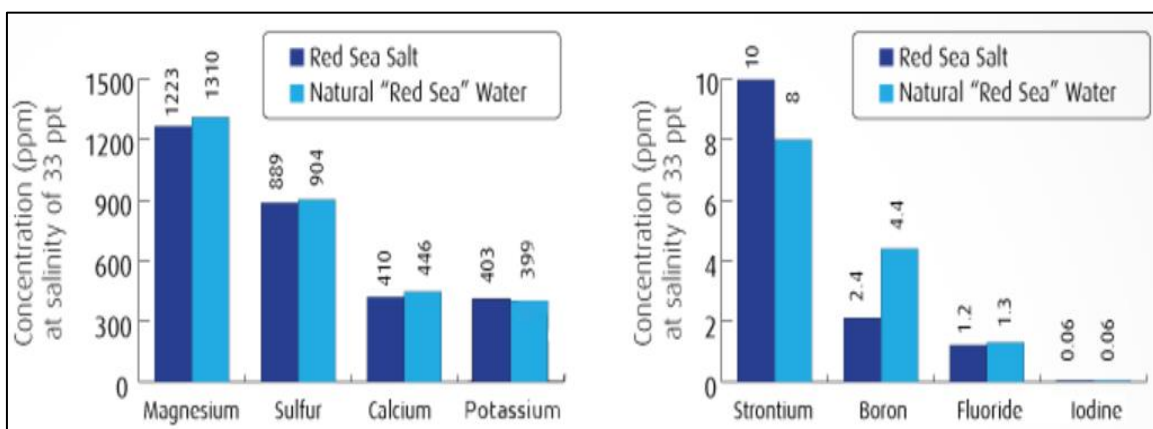
*המשתנים מייצגים ערכים יחסיים-יחידות ארביטרריות.

3.7.5 אנליזת מי ים

במחקר הוכנו מים מלאכותיים בשימוש מלח ים תעשייתי (Red Sea Salt, Cheddar UK). על מנת להעריך ולוודא כמה נוטרנטים יש במלח ים מיובש בוצעו מספר ניסויים במעבדה **NIOZ-Yerseke**, בהולנד. בדקנו את הריכוזים של סליקט, אמוניום, ניטרט, ניטריט, פוספט. הניסויים בוצעו עבור 3 ריכוזי מלח שונים, 30, 37, ו-39 גרם לליטר. האנליזה נעשתה באמצעות מכשיר SFA מדגם Quattro (Seal, Segmented Flow) (Analysis, Ontario, Canada) בשיטה הקולורימטרית.

3.7.6 חומרים ליצירת המדיום

ריכוז תמיסת הנוטריינטים הוכנה על פי פרוטוקול מוגדר על פי הספרות¹⁵⁴, תוך שימוש בכמויות שונות כפי שמפורט בטבלת נתוני סימולציות: אבקת $98\% \text{NaH}_2\text{PO}_4$ ("חן שמואל כימיקלים", חיפה, ישראל (CAS no 7558-80-7)); אבקת $99.5\% \text{NaNO}_3$ ("סיגמא", רחובות, ישראל (CAS no 7631-99-4), ישראל); אבקת NaCl (UK, Red Sea). כלל האבקות (מלבד המלח Red Sea) הוכנסו לתוך ארלנמייר בעל קיבולת של 400 מ"ל של מים מזוקקים לצורך המסת האבקה. התמיסות בריכוזים שונים הוספו למים בפוטו-ביו ריאקטור (110 ליטר) בתחילת כל סימולציה, על פי הריכוזים שהוגדרו בניסויים השונים. להלן **איור 10** הממחיש בנוסף לאמור את היסודות הנלווים להמסת המלח.



איור 10 : יסודות נלווים להמסת מלח

היסודות נכחו במדיום לשם תקופות אקלום וסימולציות

מקור: <http://www.redseafish.com/red-sea-salts/red-sea-salt>

3.7.7 מליחות וטמפרטורה

נעשה שימוש במד מליחות אנלוגי ידני (Schmidt-Haensch, Optical hand-held refractometer, Berlin, Germany) על מנת לקבוע ערכי מליחות נדרשים, ולעקוב אחר ערכי מליחות בניסויים. בקרת הטמפרטורה בוצעה באמצעות אוגר מידע (HOBO, MAOnset Ltd, UA-002-64).

3.7.8 פעפוע אוויר

אספקה סדירה של אוויר ופחמן דו חמצני למדיום הגידול בתקופת אקלום התאפשרה באמצעות משאבת אוויר (Boyu S 510 Aquarium Air Pump, Raoping, China). מדידת נפח האוויר הזורם למדיום האקלום התבצע באמצעות מד זרימת אוויר Unbreakable flow meter air (DFG-4T6T8T, Darhor, Japanese). שגיאת המכשיר המקסימלית הינה 4%.

3.7.9 מעקב הטמפרטורה בריאקטור

למערכות פוטו-ביו-ריאקטור דרושה בקרת טמפרטורה מתמדת, בדרך כלל קירור ביום וייצוב הטמפרטורה בלילה, ולכן הותקן במערכת צילר קירור. הצילר שולט על טמפרטורת המים במאגר בכל מהלך הניסויים שבוצעו בפוטו-ביו ריאקטור, ולכן הוא חובר לצנרת הריאקטור כחלק אינטגרטיבי בקומה העליונה (לאחר צאת המים מהתאים, ולפני כניסת המים לתאי הגידול). מעקב אחר שינויים בטמפרטורות מי הגידול במהלך הסימולציות בוצע באמצעות סנסור אוגר מידע (HOBO, Onset Ltd, UA-002-64, MA) שהוצמד למשאבה הטבולה כדי לקבל קריאות טמפרטורה הישר מהים המגיעים מתאי גידול האצות ומושפעים מקרינת המנורה. **בטבלה 7** להלן מוצגים הערכים המתבקשים ממערכת הקירור בסימולציות השונות לעומת מה שנמדד בפועל (ממוצע עבור כל סדרת ניסוי).

טבלה 7: תוצאות מעקב טמפ' ממכשיר HOB0 במהלך הסימולציות

שם ניסוי	משך המדידה	טמפ' ממוצעת שנמדדה בניסוי (HOB0)
1-קיץ	קריאה בכל 15 דק' לאורך כל הניסויים (3)	26.28±0.9
2-חורף	קריאה בכל 15 דק' לאורך כל הניסויים (3)	20.78±0.6
3-אביב	קריאה בכל 15 דק' לאורך כל הניסויים (2)	21.13±0.7

3.7.10 אנליזה אלמנטרית

נבחרו בסך הכול 12 אצות, מכל סימולציה (אביב, חורף, וקיץ, חורף ללא עירבוב עם אוויר), נבחרו 3 אצות אשר קצב הגידול שלהם היה הקרוב ביותר לממוצע החזרות של אותם תנאים. האצות יובשו בתנור ב-60⁰

מעלות צלזיוס למשך יממה, לאחר מכן נטחנו כל אחת לאבקה במשקל שלושה מיליגרם, ולבסוף נבדקו בהם היסודות: פחמן, מימן, חנקן, וגופרית (C, H, N, S). תוצאות המדידה התקבלו באחוזים מהאצה. המדידות לריכוזים האורגניים בוצעו המכשיר CHNS Thermo) Flash 2000 elemental analyzer (Scientific, Waltham, Massachusetts, US).

3.7.11 סטטיסטיקה וניתוח נתונים

ניתוחים סטטיסטים וכן הפקת האיור עבור תוצאו הגדילה (DGR) בוצעו באמצעות תכנת R-3.4.3 (Northern Ave, Boston, MA) R. ניתוחים סטטיסטיים לתוצאות האנליזה האלמנטרית (CHNS) בוצעו באמצעות תוכנת SPSS, לרבות Excel.

3.7.12 ניתוח תוצאות קצבי גדילה (DGR)

עבור קצב הגדילה בין קבוצות העונות השונות בוצע מבחן "anova mixed model effect permutation" כאשר העונה היא המשתנה הנבדק, והתא שבו אוחסנה האצה הוא המשתנה הרנדומלי. בוצע מבחן "Tukey" (Post-hoc) עבור תוצאות DGR.

3.7.13 שיטות ניתוח מדידות QY ממכשיר PAM 2000

ניתוח נתוני ה-PAM התבצע באמצעות מבחן "mixed model effect permutation - ancova" מאחר שבמקרה זה ישנו משתנה רציף (רמת אור אקטיבי) ומשתנה קטגוריאלי (3 תנאי הטיפול בעונות השונות).

3.7.14 בחינת הנחות

מבחן "Shapiro-Wilk" בוצע על השיירים של המודל.

3.7.15 סוגי ניתוחים לתוצאות אנליזה CHNS

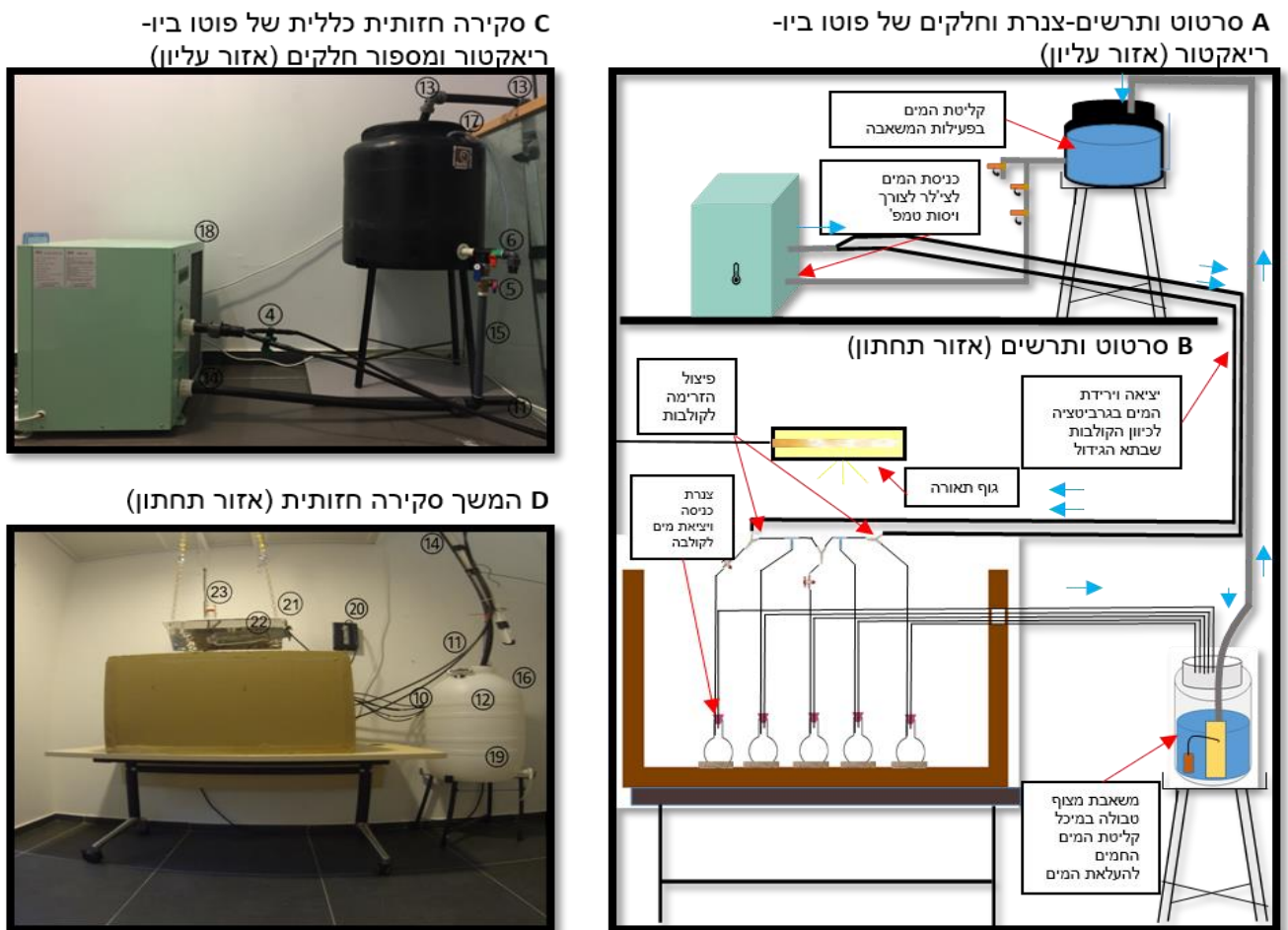
לאחר סימולציות של התנאים השונים (עונות) נבחנו ערכי התוצאות של כל פרמטר (משתנה בלתי תלוי אחד) סטטיסטית כדי לבדוק כיצד הוא שונה משאר העונות, ולכן בוצע ניתוח שונות חד-כיווני: One-Way ANOVA ו-T-test two tail. בנוסף לכך בוצעה סטטיסטיקה תיאורית (6 צירופים לפרמטר בודד). בוצעו אף מבחני המשך כדוגמת: Tukey HSD, Scheffe, LSD-Least significant Difference (טבלאות נמצאות בנספחים 4-9).

4. תוצאות

בפרק התוצאות נסקור תהליכים שונים ותוצאות של שלבי פיתוח הריאקטור. בנוסף, יוצגו התוצאות מהמדידות האלמנטריות, קצבי גידול האצות ומדידות הפוטוסינטזה. ראשית נציג מערכת מעבדתית; פוטו-ביו ריאקטור מסוג "continuous flow Photobioreactors" מדגם ראשוני לגידול מתמשך של מאקרו-אצה ממין *Ulva*. באמצעותה נוכל לחזות את ביצועי הצמיחה בגידול וגטיבי מתמשך ליצעים של האצה *Ulva*.

4.1 תמונת חתך של מערכת מלאכותית פוטו-ביו ריאקטור

ניתן לראות באיור מס' 11 את המערכת (צד ימין כולל סרטוט עם הסבר, וצד שמאל את תמונת החתך).



איור 11: תמונת חתך של מערכת מלאכותית פוטו-ביו ריאקטור הכולל סרטוט. A – מייצג שרטוט של החלק העליון של הפוטו-ביו ריאקטור עם כיווני הזרימה של המים במערכת לפני ואחרי ויסות ובקרת טמפרטורת המים. **B** – שרטוט המייצג את החלק התחתון של הפוטו-ביו ריאקטור עם אפיון צנרת אספקה וחילוף המים בקולבות, ומיכל קליטת המים והעברתם. **C** – תמונת חתך ויזואלית של הפוטו-ביו ריאקטור (חלק עליון-קומה 0) הכוללת מספור הרכיבים בקומה זו. **D** – תמונת חתך ויזואלית של הפוטו-ביו ריאקטור (חלק תחתון-קומה 1), הכוללת את מנורת הגידול מעל תא הגידול (הקולבות) ומספור הרכיבים בקומה זו. המספרים המוקפים (1), בעיגול מסמלים את הרכיבים במערכת (פירוט מלא על כלל הרכיבים הממוספרים באיור C ו-D ראה בנספחים 1 ו-2).

4.2 מבט-על – תאי גידול האצות

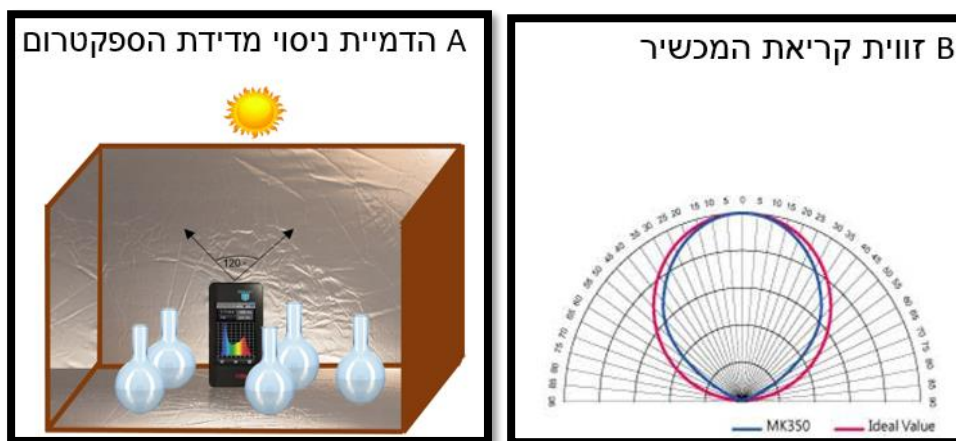
תא הגידול הואר באמצעות תאורה מלאכותית. מבט עליון ממקום הנורה (מעל תאי הגידול) והסבר על האלמנטים הפנימיים שלו ניתן לראות באיור מס' 12.



איור 12: מבט קרוב מעל תא הגידול כשאינו מואר עם 5 קולבות ומידותיו (צילום נועם ר') - A מייצג את שני צינורות הכניסה הראשיים (לפני הפיצול) לזרימה חד-כיוונית של מדיום הגידול. B – מייצג את ארבעת המפצלים של צינורות המים, וברז המווסת את הזרימה. C – מייצג את מיקום כל אחת מחמשת תאי הגידול (ממוספרים בצבע צהוב) תחת נורת הגידול. D – מייצג את פתח היציאה לאסופת חמשת הצינורות שמזרימים מים החוצה מהקולבות.

4.4 הדמיה של מדידת הספקטרום

לצורך איפיון הספקטרום בתא הגידול מוקם הגלאי בתא הגידול. לצורך המחשת המיקום וזווית הקריאה ניתן לעיין באיור מס' 13. המכשיר המוצג בתמונה הימנית (A) הוא ספקטרו-רדיומטר לאפיון פליטות (עקומי פליטה ספקטראליים).

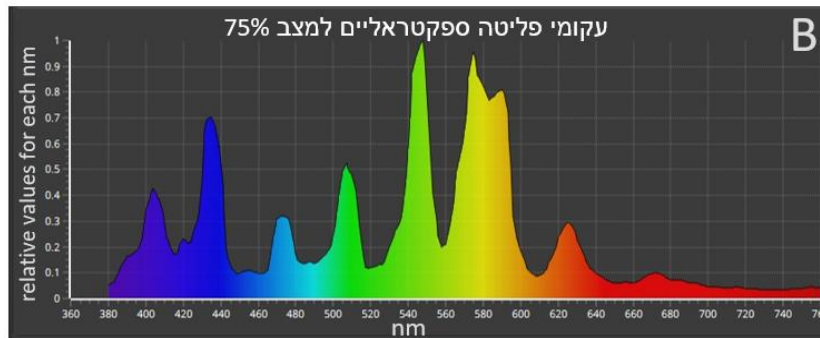
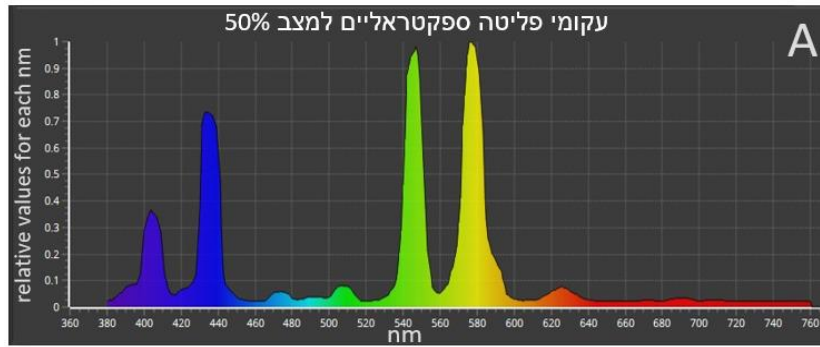


איור 13: הדמיית ניסוי מדידת ספקטרום, זווית הקריאה.

A – מייצג הדמיית מדידת ספקטרום בתוך תא הגידול של הריאקטור למקור אור יחיד. מיקום הסנסור עם פתיחת זווית 60° מעלות לכל כיוון. **B** – מייצג תיקון הקוסינוס זווית עבור ראש החיישן לאיסוף האור של מכשיר MK350N. מקור תמונה B (עמ' 38): http://www.gamma-sci.com/wp-content/uploads/2017/01/MK35N_PLUS_User_Manual_English.pdf

4.5 ניתוח תוצאות אפיון ספקטרום

לצורך אפיון התאורה המוקרנת על גבי תאי האצות (אור פולי כרומטי) בוצעה מדידה באמצעות מכשיר ספקטרו-רדיומטר, לאפיון פליטות (עקומי פליטה ספקטראליים) על פי מצבי בורר התאורה השונים, ביחידות מידה של Lux. הערך המקסימלי האפשרי הוא 1 (ובספקטרום רציף). את תוצאות המדידה ניתן לראות באיור מס' 14 (גרף A ו-B). גרפים A ו-B מתארים את אפיון הספקטרום שהתקבל ממנורת metal halide במצבי משנק/פוטנציומטר שונים (מצבי 50% או 75%) המספקים חשמל לנורה מסוג "metal halide". ערך יחסי מקסימלי בציר y עומד על ערך 1, בעוד ציר ה-X מציין את מספרי אורכי גל (380-660 nm). הגרף מייצג קריאה בודדת של המכשיר, כאשר מכשיר הקריאה עם הרגש הונח בגובה כמעט זהה לפגיעת האור בתאי הגידול, ולכיוון מעלה.



איור 14: עקומי פליטה ספקטראליים למצבי הארה 31 או 83 W/m²

A – מייצג מצב משנק שסיפק 31 W/m². בפיזור הספקטראלי של שדות האור ניתן לראות מגמות ברורות של אנרגיה אמיתית בספקטרום האור הנראה: באזור הסגול שבאורכי הגל 380-450 nm; בטווחי הירוק שבאורכי גל 495-570 nm; בטווחי האזור הצהוב שבאורכי הגל 570-590 nm. בגרף רואים גם מגמה קטנה בטווחי הכתום, שבאורכי הגל 590-620 nm. מגמה נמוכה מזו נמשכת גם באזור האדום שבאורכי הגל 620-760 nm. ערך הפיק הגבוה (580 nm) עומד על כ-0.99. ניתנה גם קריאה ביחידות לוקס (LUX 9598) ומדד רוויית הצבע שהגיעה לערך 22.8. **B** – מייצג מצב משנק שסיפק 83 W/m². פיזור ספקטראלי זהה מאוד למצב שהתקבל באיור A, אך עם העצמת מגמות בערך היחסי (ציר y) במיוחד עבור האזור הירוק, 500-510 nm, ופחות עבור אזור התכלת שבאורכי הגל 470-480 nm, והאזור האדום 620-630 nm, והתרחבות באורכי גל חדשים בתחום הצהוב 590-600 nm (העצמת הפיק הקיים) בערכים יחסיים זהים למצב הקודם בתחום הצהוב. מקור: הונפק מהתוכנה "US spectrum".

4.6 הדמיה ותיעוד מדידות ספקטרומטריות

לכל מצב של פוטנציומטר בוצע מדידות של עוצמת התאורה (איור 15).

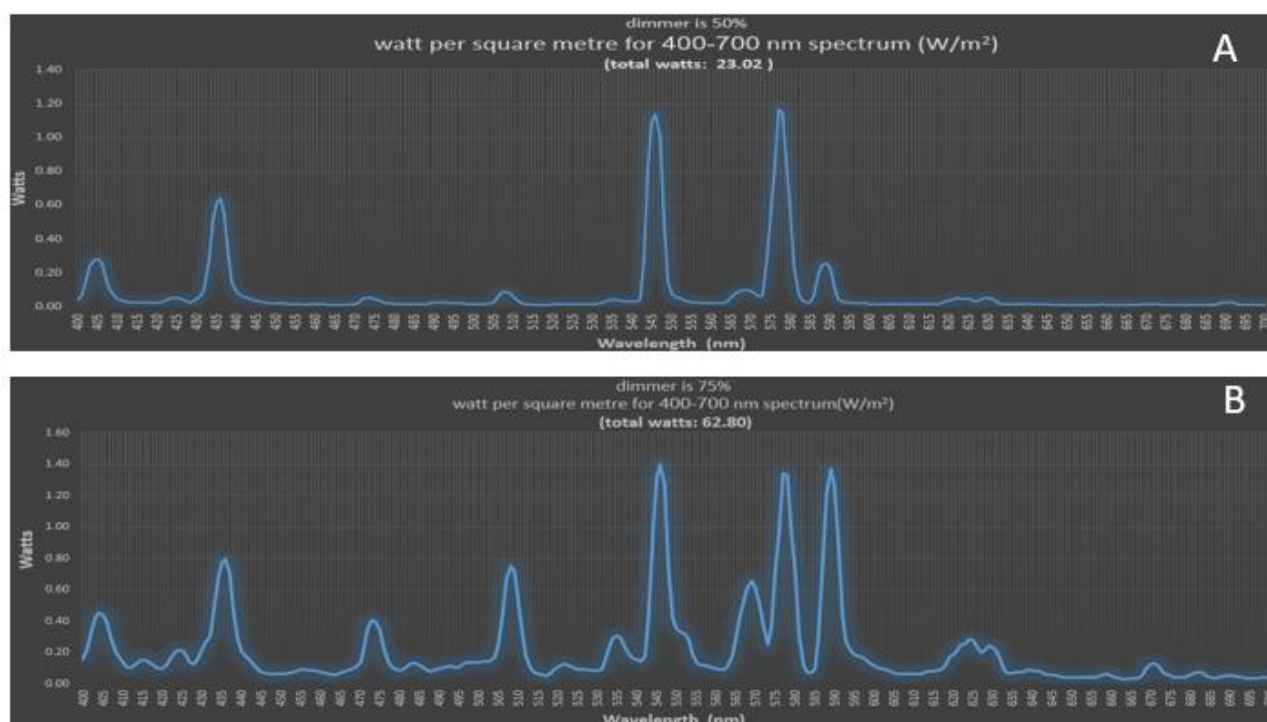


איור 15: הדמיה ותיעוד מדידות ספקטרו-מטריות (W/m^2) בתא הגידול

A – תמונה המראה במרכז התמונה את ידית הסנסור הכוללת רגש (צבע שחור) אשר כוונה כלפי הנורה שמעל לקריאת השטף. הקרינה במדידות ספקטרו-מטריות בכיסוי 180° מעלות. B – תמונה מצד שמאל של הסנסור עצמו שמוקם ואוזן לצורך קריאה מיטבית בגובה mm126 (גובה הקולבה) לשם ייצוג מדויק של שטף הקרינה המוקרן בגובה הקולבה על האצות. C – הדמיה לביצוע הניסוי בתא הגידול של PBR.

4.7 אפיון תוצאות ספקטרו-מטר

תוצאות מהמדידות שבוצעו באמצעות מכשיר ספקטרו-מטר (המודד את היחס של Watt לכל אורך גל nm) ניתן לראות בגרפים A ו-B המוצגים באיור מס' 16. באיור 16 גרפים A ו-B מייצגים חישוב קריאה שמתייחס לשטח המדידה כמטר מרובע, ומאפיינים פיזור יחסי של הקרינה על פני אורכי גל שונים בטווחי ה-400-700 ננו-מטר (PAR). ציר Y מייצג ערך מדידות כמותיות לחלוטין (W/m^2). ציר X מייצג את אורכי הגל (-700 400) ביחידות ננו-מטריות.



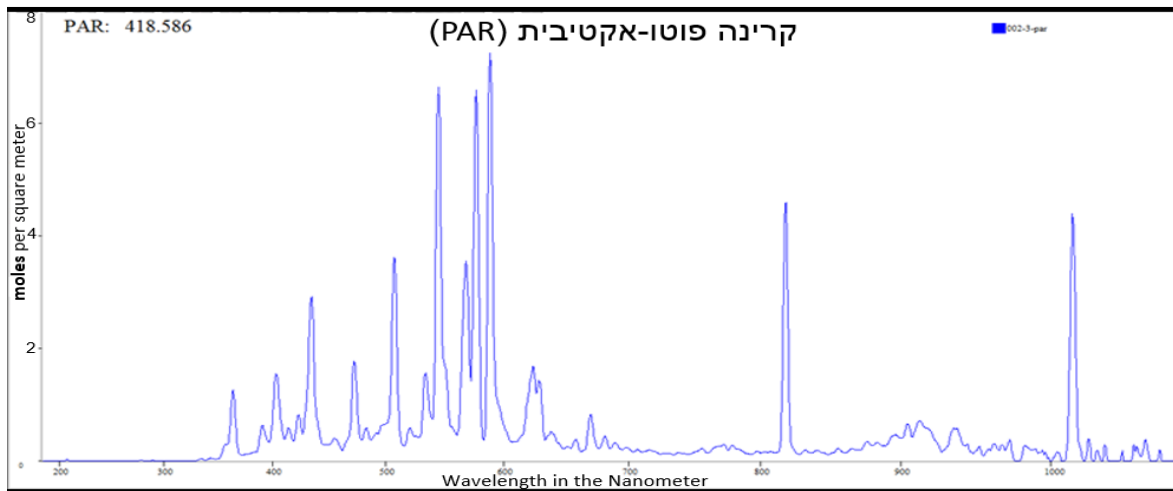
איור 16: אפיון תוצאות ספקטרומטר למצבי הארה 50%-ו-75%

גרף A – משקף קריאה כאשר הדימר היה במצב 50%. סכום האינטגרל של גרף זה הניב ערך של 29.12 (W/m^2). גרף B – משקף קריאה כאשר הדימר היה במצב של 75%. סכום האינטגרל של גרף זה הניב ערך של 62.80 (W/m^2). התוצאה משקפת ממוצע של חמש מדידות במיקומי הקולבות במערכת PBR.

4.8 קרינה פוטו-אקטיבית

תוצאות מהמדידות שבוצעו באמצעות מכשיר ספקטרומטר (PAR-photo synthetic active radiation)

לפי מקדם ביוכימי (קרינה פוטו-אקטיבית) ניתן לראות באיור מס' 17.

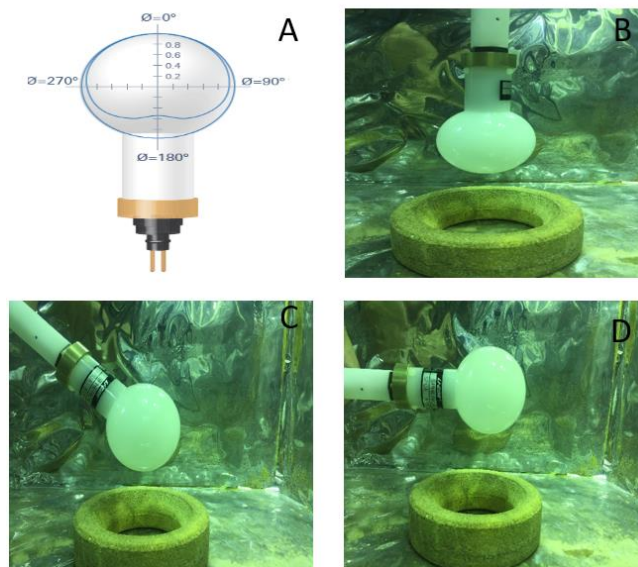


איור 17: תוצאה למדידת קרינה פוטו-אקטיבית (PAR).
 ציר ה-X מייצג את אורכי הגל, וציר ה-Y מייצג את העוצמות ביחידות $\mu\text{mol of photons m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (PAR).¹⁾

כאן נמדדה למעשה הקרינה הפעילה לאצות. בגרף מיוצג אינטגרל אורכי הגל הרלוונטיים לתהליך הפוטוסינתזה, במצב נתון. מיוצגים בו כמות הפוטונים הפוגעת על גבי תאי הגידול, ושטף הקרינה הפוטו-סינטטית מתקבל ביחידות מיקרו-מול למטר רבוע לשנייה ($\mu\text{mole m}^{-2} \text{s}^{-1}$). כאמור, האור שמוקרן יוצר את התגובה הפוטו-כימית על גבי המאקרו-אצות בתאים השונים.

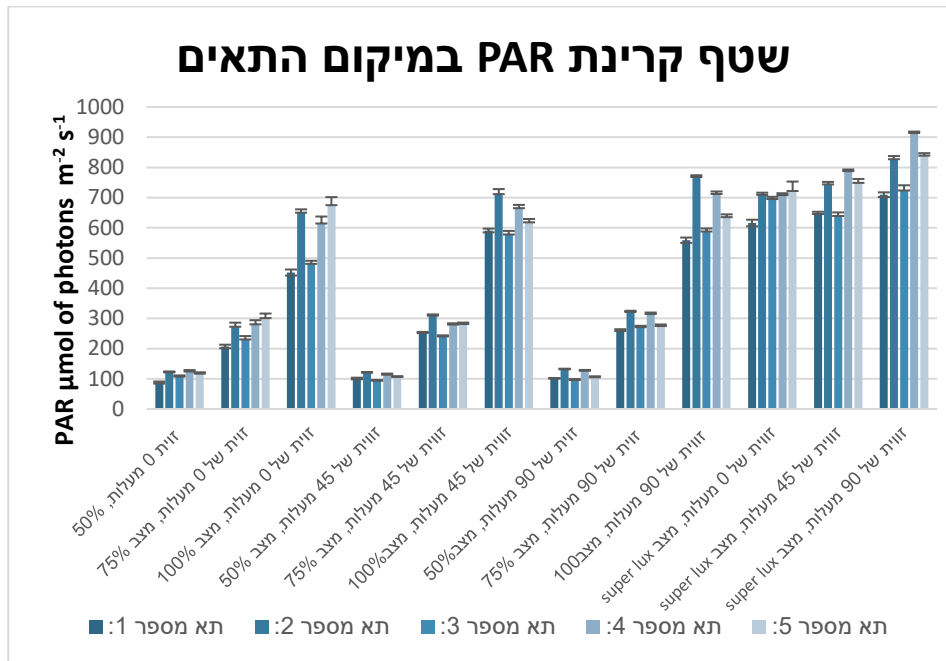
בתוך תא הגידול בוצעו מדידות גם כן מדידות לרמות התאורה, תיעוד מיקומו של הסנסור בזוויות השונות ניתן לראות באיור מס' 18.

זוויות קריאת הסנסור ביחס לקולבה



איור 18: תיעוד מדידות קרינת "PAR" באמצעות סנסור כדורי ובזוויות אופייניות ואפשריות
 הסנסור הושם במקומם של הקולבות (1-5) אשר הוצאו לטובת הניסוי. A – מייצג תגובה זוויתית טיפוסית של סנסור LI-193 - מייצג מדידה בזווית 0° מעלות. C - מייצג מדידה בזווית 45° מעלות. D - מייצג מדידה בזווית 90° מעלות. מקור איור A: https://www.fondriest.com/pdf/li-cor_li-193_spec.pdf

תוצאות המדידה מייצגות ערכי קרינה PAR מכל הכיוונים, מלבד חסימה קלה באזור בתחתון של תמונה A, וזאת בשל קיומו של הסנסור והכבל. הקונפיגורציה שנבחרה למדידות אלו היא: AIR-BALL. תוצאות המדידות למיצג B-D באיור מס' 19. התוצאות שנתקבלו בניסויים כפי שתוארו באיור מס' 18, מוצגות בפירוט רב במטה, באיור מס' 19 (שטף הקרינה שנמדד במיקום התאים).



איור 19: תוצאות שטף הקרינה שנמדד במיקום התאים

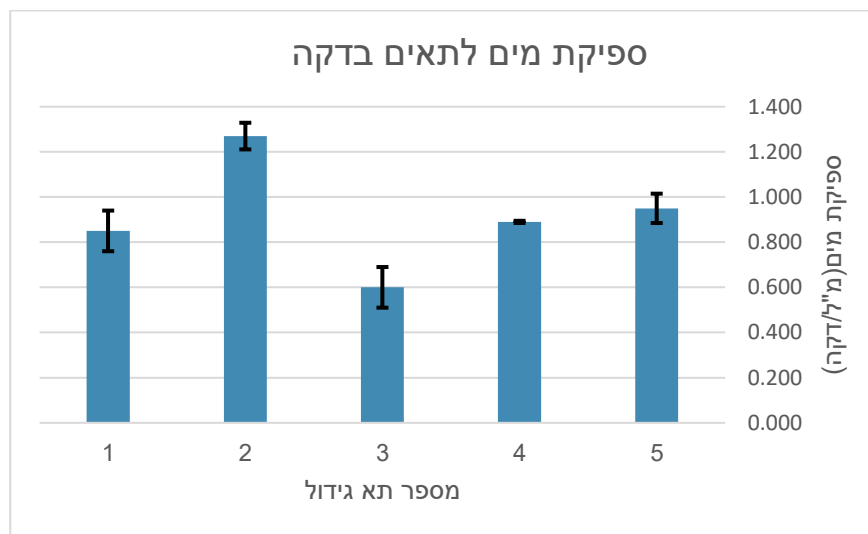
הערכים המוצגים באיור 19 הם ממוצע המדידות לאחר 106 חזרות (בתנאים זהים), ולאחר הפחתה של 1% מכלל התוצאות, בהתאם לתוצאות מדידה של בליעת התאורה על ידי זכוכית הקולבה. בעקבות התוצאות המוצגות בגרף מטה שבאיור 19 הוחלט על מיקום התאים בזווית 0° מעלות בכלל הניסויים (המחשה באיור 16 - תמונה B).

ניתן לראות כי במצב פוטנציומטר 50% ובזווית 0° מעלות ממוצע שטף הקרינה בחמשת התאים עמד על 112 $\mu\text{mol of photons m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (PAR). עוצמת האור שהאצות קיבלו בסימולציות מסוג חורף עמד על 112 וכ- 259 $\mu\text{mol of photons m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (PAR) לסימולציות מסוג קיץ ואביב.

4.9 זרימת מים בריאקטור

טעינת מים במערכת מתבצעת ממכל עליון (המפורט באיור מס' 11, תמונה D) אשר הקיבולת שלו היא עד 103 ליטרים. 7 ליטרים נוספים ניתן להזין למכל אספירטור תחתון. זרימת מים מחזורית מתרחשת החל מכמות מינימלית (הכרחית) של 80 ליטרים, וזאת בשל פעולת מצוף המשאבה שהחל מגובה מים מסוים במיכל, סוגר את המעגל החשמלי, וגורם להפעלת המשאבה. מסלול המים בריאקטור מתאפיין בירידה קבועה מהמכל העליון אל תוך הצילר לצורך קירור טמפרטורת המים, כאשר בקו המקשר ביניהם קיימים שני ברזים: האחד היה פתוח תמידית, והשני פתוח למחצה. מהצילר המים מתפצלים ויוצאים בשני צינורות בקוטר פנימי של 10 מ"מ לכיוון קומה 1, ומיד לאחר כניסתם אל תוך תא הגידול הם מתפצלים דרך מסעף ראשי, אשר תפקידו לבצע חלוקה לחמישה קולבות (תאים) בקירוב. המים זורמים אל כל אחד מחמשת התאים, ובכוח גרביטציוני, כמויות תחלופת

הים בכל תא מתוארת באיור מס' 20. לכל תא כניסה ויציאה של צינור (8 מ"מ פוליאיתילן שחור) מוכנסים בכניסה מים לאחר חיבורי מחברים ומתבצעת הורדה מקוטר של 12 (חיצוני) ל-8 (מ"מ חיצוני). אלו צינורי יציאה קצרים (8 מ"מ) ובאורך של 1.20 מטר, אשר יוצאים מתא הגידול להזנה של המיכל התחתון. בכל תא מאקרו-אצה נעה בחופשיות ובסירקולציה שנוצרת בשל זרימת המים, כתוצאה מחתך צינור הכניסה ב-45⁰ מעלות. פעילות המשאבה לסירוגין, וירידת המים בכוח הגרביטציה גורמות לסירקולציה וערבוב תמידי של הפאזה הנוזלית במערכת. יצירת חמצן מומס במי הגידול התאפשרה במהלך הניסויים בצורה תמידית מצינור שחובר למשאבה וחורר כארבע פעמים. חורים אלו הזרימו מים כלפי תחתית האספירטור בכל פעילות משאבה, וכך נוצר פכפוך אוויר במים. מערכת העברת המים כפי שתוארה נוצרה על מנת לתמוך בחילוף מים בתאי הגידול, בקצב ספיקה שמופורט באיור מס' 20.



איור 20: קצב תחלופת מים בתאים (קולבות) במהלך הסימולציות

ציר X מציג את מספר התאים בפוטו- ביו ריאקטור. ציר Y מציג תעבורה של כמות מים (מ"ל) למשך דקה. הנתונים המוצגים בגרף עם שגיאת תקן, ומשקפים מדידות בניסוי אמת המכתיבים בסך הכול 59.69 החלפות מים בתאים במשך יממה אחת של ניסוי סימולציה. שיא תחלופת המים התרחשה באופן תמידי בתא מס' 2, ועמדה על 1.270 ליטר לדקה, בעוד שהכמות המינימלית של תחלופת מים בדקה התרחשה בתא מס' 3 ועמדה רק על 600 מיליליטר לדקה.

4.10 ריכוז הנוטרינטים במלה

לצורך המחקר והמעקב בניסויים השונים על כמות התחלתית של החנקות והזרחות בוצע שימוש במפתח כמויות דשן לרמות מליחיות שונות. תוצאות אלו מוצגות בטבלה מס' 8.

טבלה 8: תוצאות ריכוזי דשנים ביחידות μM בהמסת מלח של חברת "Red Sea"

Salinity [g/l]	Silicate [μM]	Ammonium [μM]	Nitrate [μM]	Nitrite [μM]	Phosphate [μM]
30	1.10	1.64	2.07	0.09	0.16
37	1.19	1.73	2.28	0.10	0.19
39	1.35	1.89	2.35	0.09	0.19

בטבלה מס' 8 מוצגים ערכי מדידות של נוטריינטים-חנקות וזרחות שנכחו במלח שהומס לטובת הכנת מים מלאכותיים. הערכים המוצגים התקבלו עבור רמות המליחויות הבאות: 30,37,39 ביחידות PPT (parts per million). כלל הסימולציות במחקר זה בוצעו בהכנת מדיום גידול כאשר ערך המליחות שלהם לא עלה על 39.32 PPT ולא ירד מ-38.75 PPT. לפיכך, נתבסס על ערכים התחלתיים שנמצאו לרמת 39[g/l], על פי תוצאות הניסוי בהולנד.

שימוש במפתח כמויות דשן לרמות מליחויות שונות בוצע גם ביחידות נוספות (ppm) תוצאות אלו מוצגות בטבלה מס' 9.

טבלה 9: תוצאות ריכוזי דשנים ביחידות ppm בהמסת מלח של חברת "Red Sea"

Salinity [g/l]	Silicate-Si [ppm]	Ammonium-N [ppm]	Nitrate-N [ppm]	Nitrite-N [ppm]	Phosphate-P [ppm]
30	0.03	0.02	0.03	0.001	0.005
37	0.03	0.02	0.03	0.001	0.006
39	0.04	0.03	0.03	0.001	0.006

4.11 ריכוזי חנקן וזרחן בסימולציות לעונות שונות

סכימת ריכוז החנקן והזרחן הכולל (ערכים: החנן והזרחן הנלווים למלח בצירוף הערכים המוספים) בכל הניסויים שבוצעו מתוארים בטבלה מס' 10, ובצירוף ריכוז החלבון כפי שהוערך באנליזה האלמנטרית.

טבלה 10: ריכוזי חנקן וזרחן במים, והערכת חלבון באצה

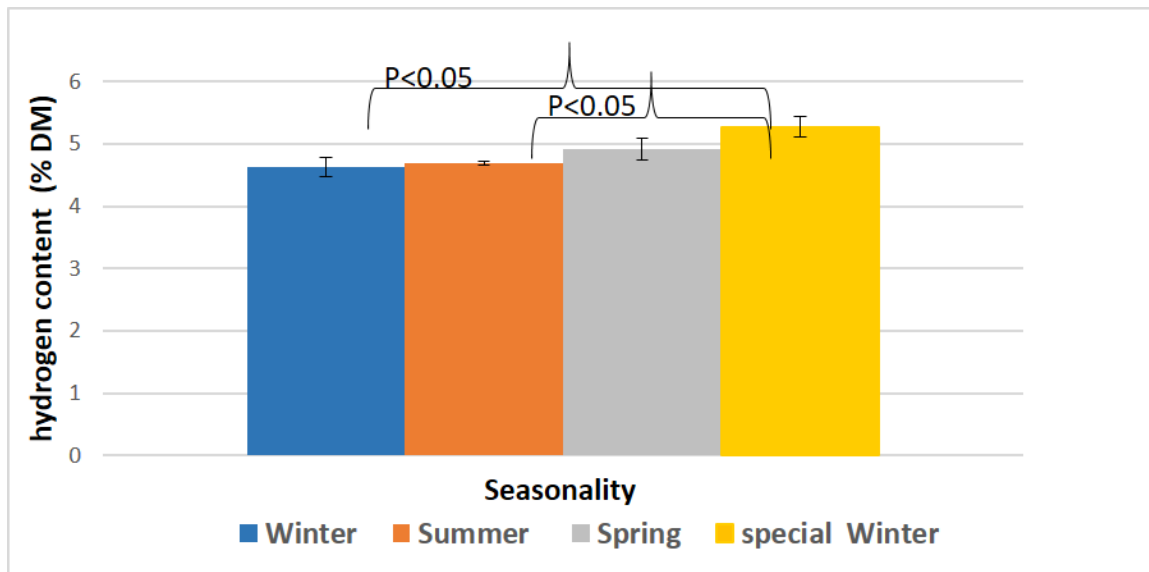
הערכת ריכוז החלבון:	ריכוז כולל ראשוני של פוספאט (μM)	ריכוז כולל ראשוני של חנקן (μM)	סימולציה:
11.99%	24.21	640.44	1-קיץ
13.15%	28.61	724.04	2-חורף

13.35%	1.48	1813.82	3-אביב
5.57%	2.86E-01	7.24	4-חורף (ניסוי ללא תחלופת מים)
9.71%	9.48E-05	3.25E-03	5-ניסוי בסיס (הרעבה)

נתוני הדשן בטבלה 10 לעיל מובאים על פי הניסויים השונים ומשקפים ערכים מפולס דשן בודד ויחיד שניתן טרם תחילת כל ניסוי. ערך החנקן הוכפל בפקטור 5.59 להערכת תכולת החלבון, כפי שדווח עבור הזן *U. fasciata*.¹¹²

4.12 אפיון תוצאות אנליזה אלמנטרית של ביומסת אצות

באיור מס' 21 ניתן לראות את ערכי המימן כפי שנמצאו לאחר כל סוג של סימולציה ברקמה. ציר X מבטא ריכוז חומר יבש, ציר Y מבטא את סוג העונה. על פי מבחן "T-test" התוצאות מעידות על הבדל מובהק בין עונת החורף לעונת החורף המיוחדת ($t(4)=-2.837, P\text{-value}=0.046$), ובנוסף כמו כן על הבדל מובהק בין עונת הקיץ והחורף המיוחדת ($t(4)=-3.398, P\text{-value}=0.027$). בין שאר הצירופים השונים לא נמצאו הבדלים מובהקים סטטיסטית. בגרף 21 לעיל מוצג הערך הממוצע שהתקבל עבור כל עונה ($n=12$). ממוצע של כלל התוצאות: 4.87 ± 0.33 (S.D).



איור 21: הערכת תכולת מימן

בטבלה 11 זו מוצגים הנתונים הסטטיסטיים של ערכי המימן שנמצאו ברקמה. הסבר משמאל לימין: עונה נבדקת, מספר התצפיות, ממוצע התוצאות, סטיית תקן, טעות תקן, רווח סמך לממוצע גבול תחתון ועליון, ערכי התוצאות המינימליים לאותה קבוצת ניסוי (עונה), וערכים המקסימליים. ניתוח ANOVA נמצא **בטבלה 12**. הערך F שייך להתפלגות F בניתוח שונות חד כיווני (ANOVA), וכאשר ה-sig (significance) גדולה מ-5% (ערך 0.05), התוצאה אינה מובהקת, כלומר ייתכן וההבדלים התקבלו באופן מקרי ולא עקב הבדל אמיתי ומשמעותי לפיכך, מן התוצאות **בטבלה 12** ניתן לראות כי מתקבלת תוצאה מובהקת בניתוח השונות ($F(3,8)=4.101, p<0.05$). עונת חורף המיוחדת מוגדרת כסימולצית גידול ללא החלפת מים בתאים.

טבלה 11: סטטיסטיקה תיאורית-הרכב מימון באצות

Descriptives

H(%)	N	Mean	Std. Deviation	Std. Error	95% Confidence Interval for Mean		Minimum	Maximum
					Lower Bound	Upper Bound		
					Winter	3		
Summer	3	4.6	.0	.0	4.5	4.8	4.6	4.7
Spring	3	4.9	.2	.1	4.1	5.6	4.6	5.2
Special Winter	3	5.2	.2	.1	4.5	5.9	4.9	5.4
Total	12	4.8	.3	.0	4.6	5.0	4.3	5.4

בטבלה 12 מוצגים ערכי התפלגות (F) ושונויות כ sig (significance).

טבלה 12: ניתוח שונות (ANOVA)-הרכב מימון באצות

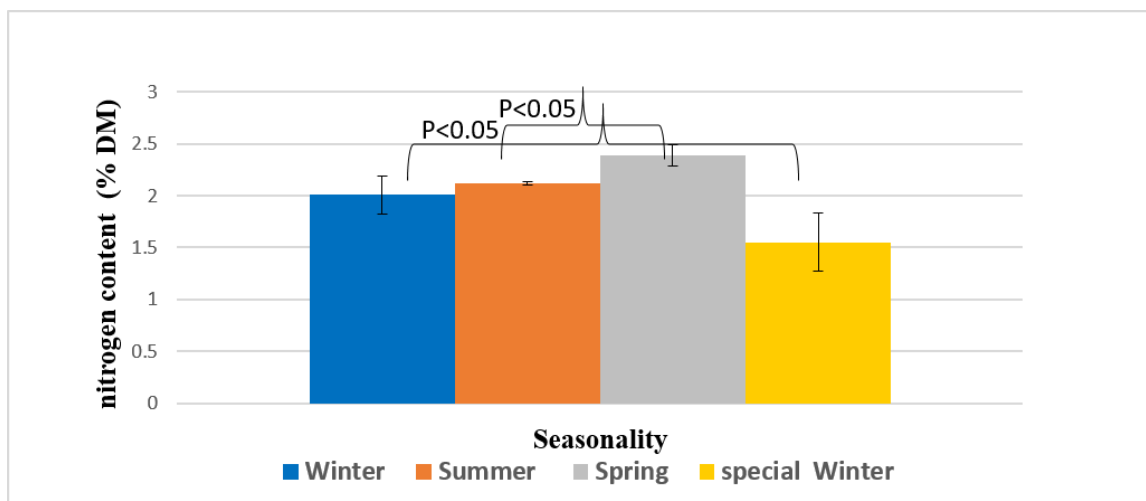
ANOVA

H(%)	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	.7	3	.2	4.101	.049
Within Groups	.4	8	.0		
Total	1.2	11			

מבחינת מבחני המשך לפי מבחן LSD נתגלו הבדלים מובהקים בין הזוגות הבאים:

- חורף לחורף מיוחד.
- קיץ לחורף מיוחד.

באיור מס' 22 ניתן לראות את ערכי חנקן ברקמה לכל סימולציה. ציר X מבטא ריכוז חומר יבש, ציר Y מבטא את סוג העונה. על פי מבחן "T-test" התוצאות מעידות על הבדל מובהק בין עונת האביב לעונת החורף המיוחד (הבדל מובהק של 4.87% טעות, קרוב ל-5%, מהצד של המובהק ולא של הלא-מובהק). בין עונת הקיץ לאביב לא התקבלה מובהקות, אך התוצאה קרובה לכך (P-) $t(4)=-2.64$, $t(4)=2.801$, P-value=0.048. בין שאר הצירופים השונים לא נמצאו הבדלים מובהקים סטטיסטית. **באיור 22** לעיל מוצג הערך הממוצע שהתקבל עבור כל עונה (n=12). ממוצע של כלל התוצאות: 2.01 ± 0.40 (S.D).



איור 22: הערכת תכולת חנקן באצות

בטבלה 13 מוצגים הנתונים הסטטיסטיים של ערכי החנקן שנמצאו ברקמה. הסבר משמאל לימין: עונה נבדקת, מספר התצפיות, ממוצע התוצאות, סטיית תקן, טעות תקן, רווח סמך לממוצע גבול תחתון ועליון, ערכי התוצאות המינימליים לאותה קבוצת ניסוי (עונה), וערכים המקסימליים.

טבלה 13: סטטיסטיקה תיאורית – חנקן באצות

Descriptives

N	N	Mean	Std. Deviation	Std. Error	95% Confidence Interval for Mean		Minimum	Maximum
					Lower Bound	Upper Bound		
					winter	3		
Summer	3	2.1	.02	.01	2.0	2.1	2.0	2.1
Spring	3	2.3	.17	.10	1.9	2.8	2.2	2.5
Special Winter	3	1.5	.48	.28	.3	2.7	1.0	1.9
Total	12	2.0	.40	.11	1.7	2.2	1.0	2.5

ניתוח ANOVA מופיע **בטבלה 14**. הערך F שייך להתפלגות F בניתוח שונות חד כיווני (ANOVA), וכאשר ה-sig (significance) גדולה מ-5% (ערך 0.05), התוצאה אינה מובהקת, כלומר ייתכן וההבדלים התקבלו באופן מקרי ולא עקב הבדל אמיתי ומשמעותי לפיכך, **בטבלה 14** לעיל ניתן לראות כי עבור ה-N התקבלו תוצאות לא מובהקות אך קרובות למובהקות ($F(11)=3.94, p=0.054$). עם זאת, חשוב לציין כי גם כאשר ההבדלים אינם מובהקים ברמת המובהקות של 5%, הם אינם רחוקים במיוחד מ-5% – שכן רמת המובהקות שנתקבלה היא 5.4%.

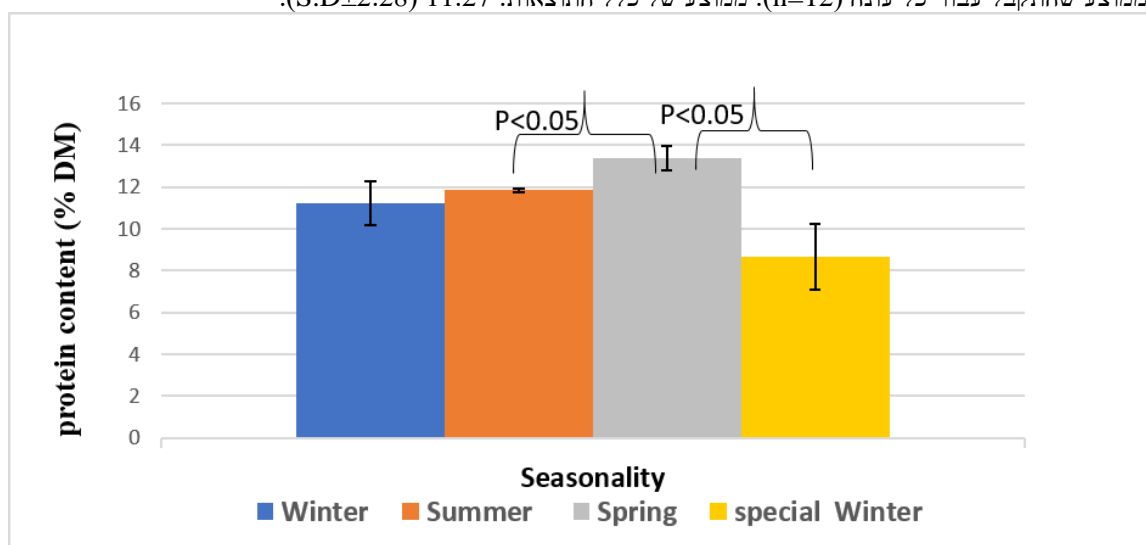
טבלה 14: ניתוח שונות (ANOVA) – חנקן באצות

ANOVA

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	1.1	3	.3	3.940	.054
Within Groups	.7	8	.0		
Total	1.8	11			

לפי מבחן LSD יש הבדלים מובהקים בין הזוג הבא: אביב לחורף מיוחד.

באיור מס' 23 ניתן לראות את ערכי החלבון כפי שנמצאו לאחר כל סוג של סימולציה ברקמה. ציר X מבטא ריכוז חומר יבש, ציר Y מבטא את סוג העונה. על פי מבחן "T-test" התוצאות מעידות על הבדל מובהק בין עונת האביב לעונת החורף המיוחד (t(4)=2.801, P-value=0.048), [הבדל מובהק של 4.87% טעות. קרוב ל-5%, אך מהצד של המובהק ולא של הלא מובהק]. בין עונת הקיץ לאביב לא התקבלה מובהקות אך התוצאה קרובה לכך t(4)=-2.64, P-value=0.057). בין שאר הצירופים השונים לא נמצאו הבדלים מובהקים סטטיסטית. בגרף מוצג הערך הממוצע שהתקבל עבור כל עונה (n=12). ממוצע של כלל התוצאות: 11.27 (S.D±2.28).



איור 23: הערכת תכולת חלבון

בטבלה 15 מוצגים הנתונים הסטטיסטיים של ערכי החלבון שנמצאו ברקמה. הסבר משמאל לימין: עונה נבדקת.

טבלה 15: סטטיסטיקה תיאורית – חלבון באצות.

Descriptives

Val	N	Mean	Std. Deviation	Std. Error	95% Confidence Interval for Mean		Minimum	Maximum
					Lower Bound	Upper Bound		
					Winter	3		
Summer	3	11.8	.1	.0	11.4	12.2	11.6	11.9
Spring	3	13.3	.9	.5	10.9	15.8	12.3	14.3
Special Winter	3	8.6	2.7	1.5	1.81	15.4	5.51	10.6
Total	12	11.2	2.2	.6	9.81	12.7	5.51	14.3

ניתוח ANOVA מופיע בטבלה 16. הערך F שייך להתפלגות F בניתוח שונות חד כיווני (ANOVA), וכאשר ה-sig (significance) גדולה מ-5% (ערך 0.05), התוצאה אינה מובהקת, כלומר ייתכן וההבדלים התקבלו באופן מקרי ולא עקב הבדל אמיתי ומשמעותי לפיכך, ובדומה לתוצאות ה-N, התקבלו תוצאות לא מובהקות אך קרובות למובהקות ($F(3,8)=3.94$, $p=0.054$); עם זאת, גם כאן חשוב לציין כי גם כאשר ההבדלים אינם מובהקים ברמת מובהקות של 5%, הם אינם רחוקים במיוחד מ-5% – רמת המובהקות שנתקבלה היא 5.4%.

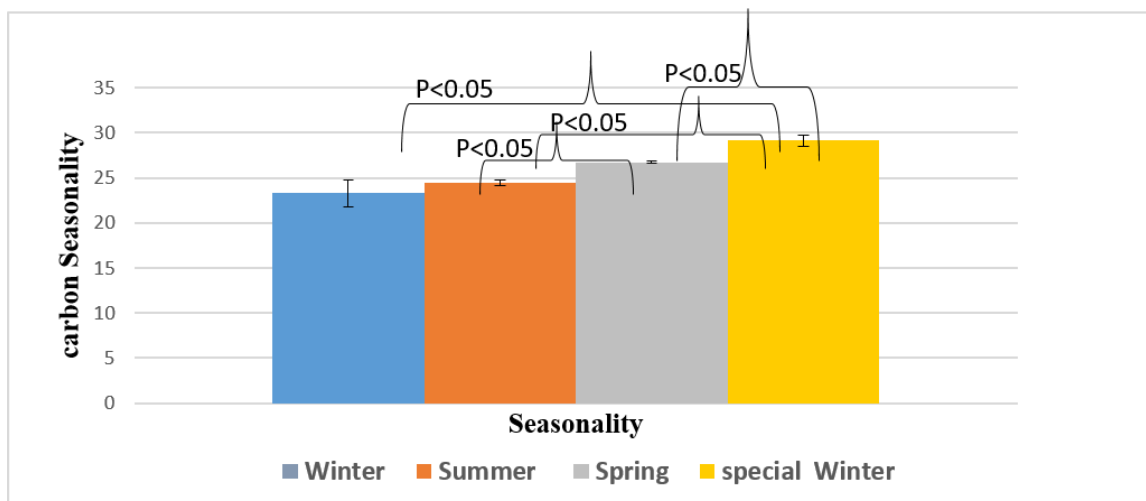
טבלה 16: ניתוח שונות ANOVA-חלבון

ANOVA

Val	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	34.3	3	11.4	3.940	.054
Within Groups	23.2	8	2.91		
Total	57.6	11			

לפי מבחן LSD יש הבדלים מובהקים בין הזוג הבא: אביב לחורף מיוחד.

באיור מס' 24 ניתן לראות את ערכי פחמן כפי שנמצאו לאחר כל סוג של סימולציה ברקמה. ציר X מבטא ריכוז חומר יבש, ציר Y מבטא את סוג העונה. על פי מבחן "T-test" התוצאות מעידות על הבדלים מובהקים בין עונת החורף לעונת החורף המיוחד ($t(4)=-3.61$, $P\text{-value}=0.022$), בין עונת הקיץ לאביב ($t(4)=-7.01$, $P\text{-value}=0.002$), בין עונת הקיץ לחורף המיוחד ($t(4)=-7.19$, $P\text{-value}=0.001$), ובין עונת האביב לעונת החורף המיוחד ($t(4)=-3.93$, $P\text{-value}=0.017$). בין שאר הצירופים השונים לא נמצאו הבדלים מובהקים סטטיסטית. בגרף 23 לעיל מוצג הערך הממוצע שהתקבל עבור כל עונה ($n=12$). ממוצע של כלל התוצאות: 25.90 ± 2.63 (S.D).



איור 24: הערכת תכולת פחמן

בטבלה 17 מוצגים הנתונים הסטטיסטיים של ערכי הפחמן שנמצאו ברקמה. הסבר משמאל לימין: עונה נבדקת, מספר התצפיות, ממוצע התוצאות, סטיית תקן, טעות תקן, רווח סמך לממוצע גבול תחתון ועליון, ערכי התוצאות המינימליים לאותה קבוצת ניסוי (עונה), וערכים המקסימליים.

טבלה 17: סטטיסטיקה תיאורית – פחמן

Descriptives

	N	Mean	Std. Deviation	Std. Error	95% Confidence Interval for Mean		Minimum	Maximum
					Lower Bound	Upper Bound		
winter	3	23.2	2.61	1.51	16.8	29.7	21.4	26.2
Summer	3	24.4	.4	.28	23.2	25.6	23.8	24.7
Spring	3	26.7	.2	.16	26.0	27.4	26.4	27.0
Special Winter	3	29.1	1.0	.58	26.6	31.6	28.1	30.1
Total	12	25.9	2.6	.76	24.2	27.5	21.4	30.1

ניתוח ANOVA עבור ערכי פחמן מופיע **בטבלה 18**. הערך F שייך להתפלגות F בניתוח שונות חד כיווני (ANOVA), וכאשר ה-sig (significance) גדולה מ-5% (ערך 0.05), התוצאה אינה מובהקת, כלומר ייתכן וההבדלים התקבלו באופן מקרי ולא עקב הבדל אמיתי ומשמעותי לפיכך, התוצאות **בטבלה 18** לעיל מראות כי מתקבלת תוצאה מובהקת בניתוח השונות (F(11)=9.87, p<.01).

טבלה 18: ניתוח שונות ANOVA-פחמן

ANOVA

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	60.1	3	20.0	9.870	.005
Within Groups	16.2	8	2.03		
Total	76.3	11			

מבחינת מבחני המשך:

לפי מבחן טוקי נתגלו הבדלים מובהקים בין הזוגות הבאים:

- חורף לחורף מיוחד.
- קיץ לחורף מיוחד.

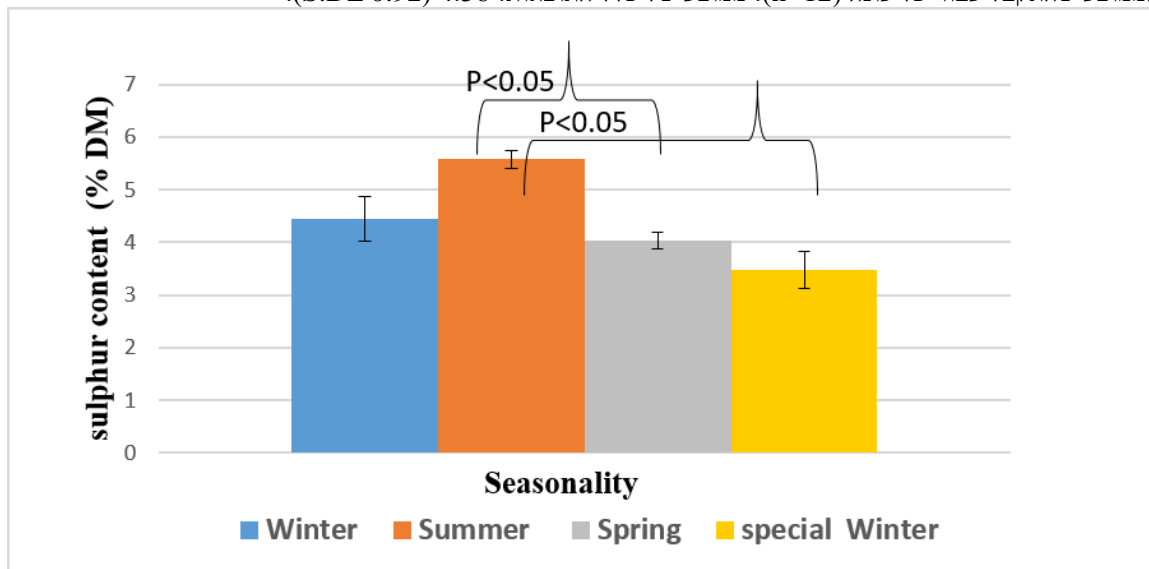
לפי מבחן שופה נתגלו הבדלים מובהקים בין הזוגות הבאים:

- חורף לחורף מיוחד.
- קיץ לחורף מיוחד.

לפי מבחן LSD נתגלו הבדלים מובהקים בין הזוגות הבאים:

- חורף לאביב.
- חורף לחורף מיוחד.
- קיץ לחורף מיוחד.

באיור מס' 25 ניתן לראות את ערכי הגופרית כפי שנמצאו לאחר כל סוג של סימולציה ברקמה. ציר X מבטא ריכוז חומר יבש, ציר Y מבטא את סוג העונה. על פי מבחן "T-test" התוצאות מעידות על הבדל מובהק בין עונת האביב לעונת הקיץ ($t(4)=6.667$, P-value=0.002), ועל הבדל מובהק בין עונת הקיץ לעונת החורף המיוחד ($t(4)=4.41$), בין שאר הצירופים השונים לא נמצאו הבדלים מובהקים סטטיסטית. בגרף 24 לעיל מוצג הערך הממוצע שהתקבל עבור כל עונה ($n=12$). ממוצע של כלל התוצאות: 4.38 ± 0.92 (S.D).



איור 25: הערכת תכולת גופרית

בטבלה 19 מוצגים הנתונים הסטטיסטיים של ערכי הגופרית שנמצאו ברקמה. הסבר משמאל לימין: עונה נבדקת, מספר התצפיות, ממוצע התוצאות, סטיית תקן, טעות תקן, רווח סמך לממוצע גבול תחתון ועליון, ערכי התוצאות המינימליים לאותה קבוצת ניסוי (עונה), וערכים המקסימליים.

טבלה 19: ניתוח שונות – גופרית

Descriptives

S(%)

	N	Mean	Std. Deviation	Std. Error	95% Confidence Interval for Mean		Minimum	Maximum
					Lower Bound	Upper Bound		
Winter	3	4.4	.7	.4	2.5	6.2	3.7	5.1
Summer	3	5.5	.2	.1	4.8	6.3	5.2	5.7
Spring	3	4.0	.2	.1	3.3	4.7	3.8	4.3
Special Winter	3	3.4	.6	.3	1.9	4.9	3.0	4.1
Total	12	4.3	.9	.2	3.7	4.9	3.0	5.7

ניתוח ANOVA עבור תכולת הגופרית מוצג ב**טבלה 20**. הערך F שייך להתפלגות F בניתוח שונות חד כיווני (ANOVA), וכאשר ה-sig (significance) גדולה מ-5% (ערך 0.05), התוצאה אינה מובהקת, כלומר ייתכן וההבדלים התקבלו באופן מקרי ולא עקב הבדל אמיתי ומשמעותי לפיכך, התוצאות ב**טבלה 20** לעיל מראות כי מתקבלת תוצאה מובהקת בניתוח השונות ($F(3,8)=8.849, p<.01$).

טבלה 20: ניתוח שונות (ANOVA) – גופרית

ANOVA

S(%)

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	7.1	3	2.3	8.849	.006
Within Groups	2.1	8	.27		
Total	9.3	11			

מבחינת מבחני המשך:

לפי מבחן טוקי נתגלו הבדלים מובהקים בין הזוגות:

- קיץ לאביב
- קיץ לחורף מיוחד

לפי מבחן שופה נתגלו הבדלים מובהקים בין הזוגות:

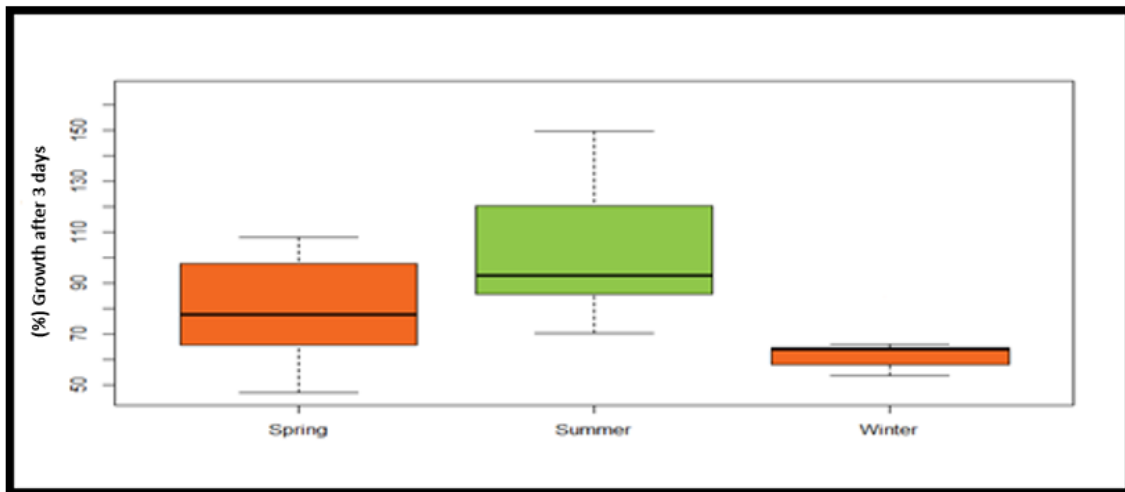
- קיץ לאביב
- קיץ לחורף מיוחד

לפי מבחן LSD נתגלו הבדלים מובהקים בין הזוגות הבאים:

- חורף לקיץ.
- קיץ לאביב.
- קיץ לחורף מיוחד.

4.14 תוצאות גידול ביומסה

איור 21 מראה תוצאות מניסויי הגדילה של סימולציית הקיץ יש הרבה שונות, וישנה חפיפה עם ערכי התוצאות מסימולציית האביב, שגם בה נמצאה שונות. תוצאות הגידול של סימולציות חורף אחידות מאוד, ועם הכי פחות שונות בהשוואה לשאר העונות, ואין הבדל מובהק בין החורף לאביב. ממוצע הגדילה ל-3 ימים בסימולציית תנאי האביב עמד על כ- 79.93% וערך סטיית התקן עמד על 20.42; ממוצע הגדילה ל-3 ימים בסימולציית תנאי הקיץ היה כ- 103.27%, ערך סטיית תקן עמד על 24.32; ממוצע הגדילה ל-3 ימים בסימולציית חורף עמד על כ-63.26% וסטיית תקן לעונה עמד על 7.36. שתי הנקודות בצבע שחור בחלק העליון של הנתונים לגבי סימולציית חורף משקפות שתי תוצאות גבוהות מהממוצע העונתי בטווחי 15.42 ו-14.01% (DGR) שהתקבלו בחזרות נפרדות. במבחן זה הוחרג נתון יחיד שהיה בעל ערך DGR ביומסה שלילית (-12.50%) בשל תהליך התרבות תוך כדי הסימולציה (ספרולציה). תוצאה זו לא נכללה בחישובים הסטטיסטיים, ולכן לא פורסמה, ואינה מופיעה בגרף ה-"box plots". הקווים השחורים המודגשים מייצגים ערך חציון לחזרות באותו התנאי.



* מוצגות התוצאות מ-3 ניסויים לעונת חורף והקיץ, ומ-2 ניסויים של עונת האביב.

איור 26: גרף "box plots" התפלגות אחוזי הגדילה עבור סימולציות שונות

ניתוח סטטיסטי של הנתונים מלמד כי במבחן שנערך לתוצאות סימולציה לעונת החורף הוחרג נתון יחיד שהיה בעל ערך DGR ביומסה שלילית (-12.50%) בשל תהליך התרבות תוך כדי הסימולציה (ספרולציה), כמו כן שתי הנקודות בחלק העליון של הגרף משקפות שתי תוצאות גבוהות מהממוצע העונתי בטווחי 15.42-14.01% (DGR) שהתקבלו בחזרות נפרדות. סטטיסטית, נמצא שהנתונים מתפלגים נורמלית מאחר שנמצא שערכו של p value גבוה מ-0.05, ולכן אנו מקבלים את השערת ה-0 (שהשיירים שהוכנסו מתפלגים נורמלית). בהקשר למבחן permutation, גודל המדגם אינו שווה (עונת האביב), ולכן בחרנו לבצע את מבחן ה-"permutation" (ANOVA). פירוט כולל של התוצאות השקילה מופיע בטבלה מס' 21.

מטבלה 21 ניתן ללמוד שאם הערך "p value" קטן מ-0.05 יש הבדל מובהק, ואם הערך גדול מ-0.05 אין הבדל מובהק. עוד למדים שרק בין עונת החורף והאביב הערך גדול, ולכן אין הבדל. על פי תוצאות המבחן ניתן לראות כי נמצאו הבדלים בין העונות חורף וקיץ, וקיץ ואביב (רק הקיץ שונה באופן מובהק משאר העונות).

טבלה 21: תוצאות למבחן Tukey עבור תוצאות DGR

	diff	lwr	upr	p adj (p value)
Summer-Spring	23.3	4.53	42.1	P<0.05,(0.01)
Winter-Spring	-16.6	-35.7	2.3	P>0.05,(0.09)
Winter-Summer	-40.0	-57.1	-22.9	P<0.05,(0.00)

הערכים המשקליים של התאוסים כפי שנצפו בתאים השונים (1-5) לפני ביצוע הסימולציה ואחריה מוצגים עבור כל סוגי הניסויים בטבלה מס' 22.

טבלה 22: סיכום תוצאות הגידול מהסימולציות

Number of experiment and type of simulation:	biomass weight (Before and after the experiment) in cell 1:	biomass weight (Before and after the experiment) in cell 2:	biomass weight (Before and after experiment) in cell 3:	biomass weight (Before and after experiment) in cell 4:	biomass weight (Before and after experiment) in cell 5:
Winter, A14	0.19	0.184	0.184	0.196	0.191
	0.305	0.161	0.294	0.301	0.314
Winter, A15	0.198	0.197	0.197	0.195	0.197
	0.351	0.327	0.324	0.308	0.323
Winter, A16	0.199	0.197	0.199	0.198	0.2
	0.309	0.352	0.327	0.308	0.328
Summer, A17	0.198	0.2	0.198	0.199	0.2
	0.382	0.384	0.414	0.339	0.499
Summer, A18	0.2	0.189	0.145	0.192	0.197
	0.445	0.462	0.316	0.352	0.444
Summer, A19	0.2	0.198	0.197	0.192	0.196

	0.413	0.375	0.358	0.36	0.346
spring, A20	0.201	0.2	0.197	0.2	0.198
	0.295	0.382	0.344	0.395	0.328
spring, A21	0.197	0.2	0.199	0.186	0.199
	0.307	0.359	0.35	0.387	0.407
A special experiment, without water exchange/flow	0.197	0.2			0.2
	0.228	0.234			0.305

ערכי הגדילה הממוצעים כפי שנצפו בתאים בכל אחד מהניסויים (לרבות חישוב ממוצע לניסוי) מוצגים בטבלה מס' 23.

טבלה 23: סטטיסטיקה של תוצאות הגידול

Number of experiment and type of simulation:	Percent growth in colva 1:	Percent growth in colva 2:	Percent growth in colva 3:	Percent growth in colva 4:	Percent growth in colva 5:	Average DGR for the experiment:
Winter, A14	60.5%	-12.5%	59.7%	53.5%	64.4%	59.5%
Winter, A15	77.2%	65.9%	64.4%	57.9%	63.9%	65.9%
Winter, A16	55.2%	78.6%	64.3%	55.5%	64.0%	63.5%
Summer, A17	92.9%	92.0%	109.0%	70.3%	149.5%	102.7%
Summer, A18	122.5%	144.4%	117.9%	83.3%	125.3%	118.7%
Summer, A19	106.5%	89.3%	81.7%	87.5%	76.5%	88.3%
spring, A20	46.7%	91.0%	74.6%	97.5%	65.6%	75.1%
spring, A21	55.8%	79.5%	75.8%	108.0%	104.5%	84.7%
A special experiment	15.7%	17.0%	24.7%	44.2%	52.5%	30.8%


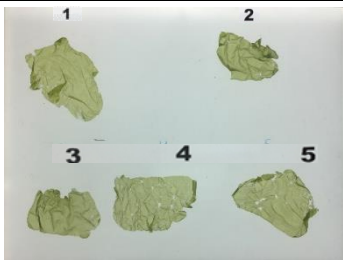

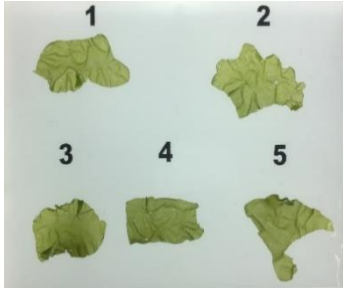
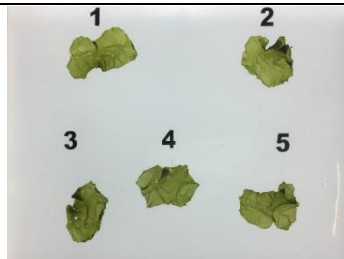
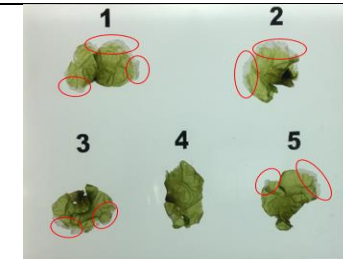
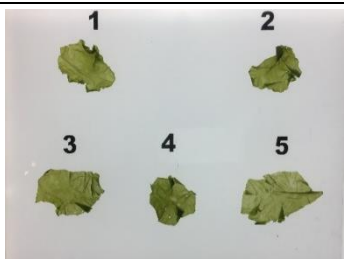
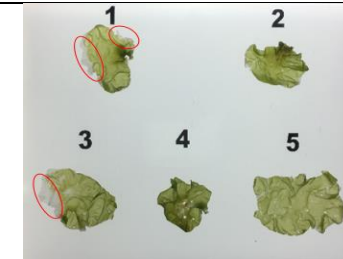


*הניסוי המיוחד בוצע במערכת אך ללא זרימה/תנועת מים.

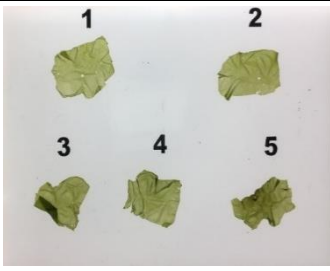

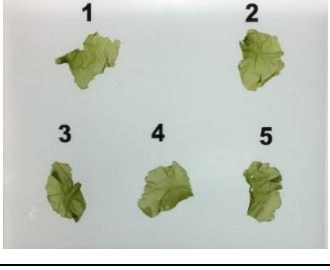


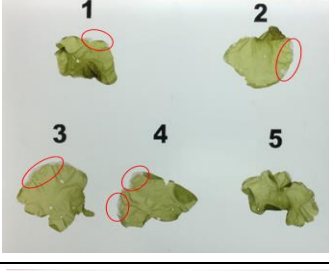
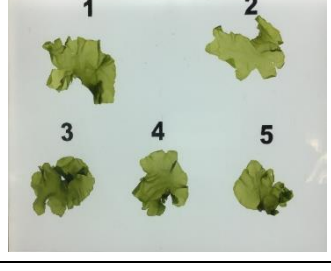
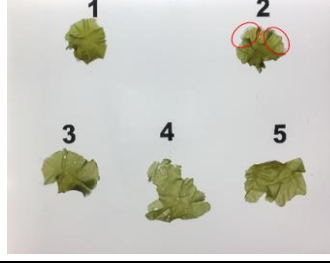
4.15 שינויים פיזיולוגיים של האצות

תיעוד צילומי לטאלוסים שנבחרו למחקר בוצע לפני הסימולציה, ולאחריה וזאת בכדי לאמוד ויזואלית את קצב הגידול מורפולוגית ולאחר תהליכי ספרולציה אינדיבדואליים (לכל תא). התיעוד מופיע בטבלה מס' 24. בתמונות בטבלה 23 מוצגים שינויים פיזיולוגיים של האצות (לפני) תאלוסים של מאקרו-אצה (*Ulva* 200 mg). (הבדלים בין התמונות (לפני ואחרי סימולציה) ממחישים קיום/אי-קיום תהליכי ספרולציה בעקבות ניסויי הסימולציות השונים. ההשפעה מסומנות בצורת אליפסה הצבועה בצבע אדום, אשר נצפו וסומנו על פני 4 אצות

בניסוי יחיד אשר דימה תנאי חורף. השפעה כזו נצפתה על פני 2 אצות בניסוי יחיד אשר דימה תנאי קיץ, בנוסף על פני 4 אצות בניסוי יחיד שדימה תנאי עונת האביב, ואף על פני אצה בודדת לאחר ניסוי אשר דימה תנאים מיוחדים של עונת החורף. סך ההשפעה (בדרגות שונות) חלה על 24.4% מכלל התאלוסים שהשתתפו במדגם זה.

טבלה 24: צילומי מעקב שינוי וגדילה באצת *Ulva* במהלך הגידול.

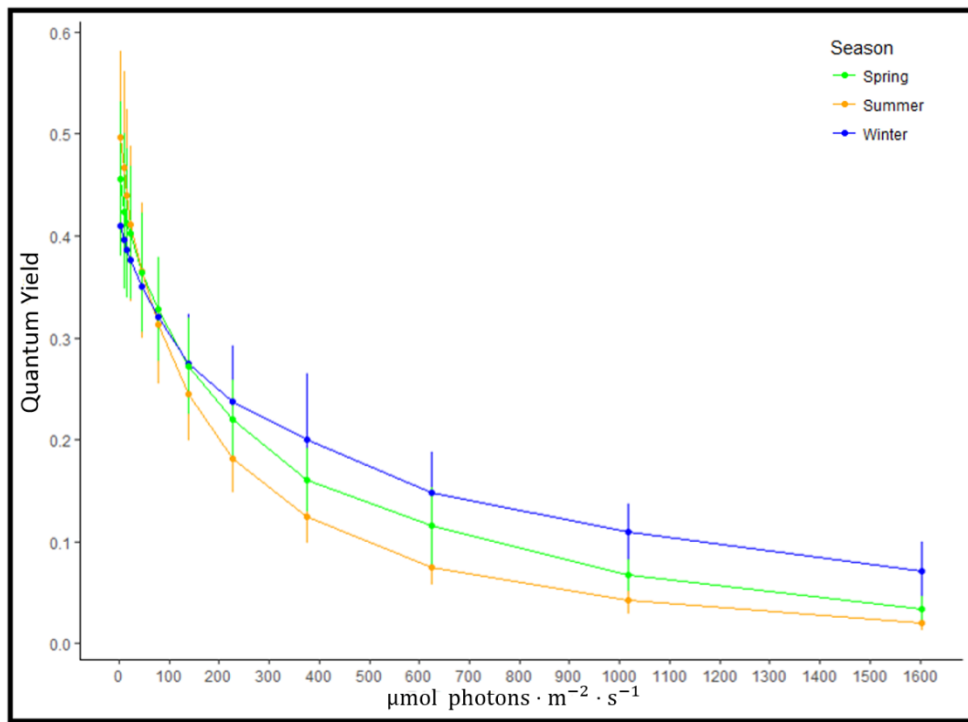
Experiment No.	season	before the simulation	after the simulation
1 (A14)	winter		
1 (A15)	winter		
1(A16)	winter		
2 (A17)	summer		
2 (A18)	summer		

2 (A19)	summer		
3 (A20)	Spring		
3 (A21)	Spring		
4 (A22)	December -without water exchange		

4.16 יעילות פוטו-סינטיטית

ניתוח סטטיסטי של הנתונים מלמד שערכי quantum yield לא עמדו בהנחות של מבחן "ancova" רגילה, אשר בוצע על השיירים של המודל. כלומר הבדיקה אם ההתפלגות נורמלית, מבחן p shapiro wilk (value<0.05). לפיכך בחרנו לבצע מבחן "permutation ancova" אשר תוצאותיו מוצגים באיור מס' 27. במבחן זה עלו התוצאות שלהלן:

- א. נמצא הקשר בין עוצמת האור לערך יעילות הפוטוסינתזה (QY).
- ב. במבחן זה ממוצע ערכי ה quantum yield לא התפלגו נורמלית.
- ג. התוצאות מראות שאין הבדל בין הסימולציות של העונות.



איור 27: ערכי יעילות פוטו סינטטית של תאלוסי *Ulva* עבור הסימולציות לעונות שונות

הנקודות באיור 27 מייצגות ערך ממוצע של יעילות פוטו-סינטטית כפונקציה של עוצמת קרינה לפי העונה הספציפית, על פי 12 עוצמות פלאש שנבחנו. ניתן לראות שככל שעוצמת ה-PAR הולכת וגדלה, כך ההשפעה על ערך QY יורדת במגמה אקספוננציאלית, מגמה שכאמור נמצאה זהה לחלוטין בערכיה בכל אחת משלוש העונות השונות שנבדקו (n=8). לפי תוצאות מבחן "permutation ancova" (שנבחר כאמור כיוון שהנתונים לא התפלגו נורמלית) לא נמצא כל הבדל מובהק בין העונות. ניתן לראות זאת גם בערכי השונות עבור שלוש העונות בגרף (קווים אנכיים) חופפים אחד את השני, משמע שלטיפול לא הייתה השפעה מובהקת. בהתמקדות על ערכי QY המקסימליים (הערכים שנתקבלו עבור פולס של 1.6) ניתן לזהות מגמה על פי הסדר היורד הבא: עונת הקיץ (0.49); עונת האביב (0.45); עונת החורף (0.41). סטיות התקן למדידות אלו נעו בעונת האביב בטווחי 0.012-0.076, בעונת הקיץ בטווחי 0.008-0.094, ובעונת החורף בטווחי 0.023-0.055. יחסי סטיית התקן לערכי ה-QY הממוצעים עבור 12 הנקודות השונות נעו בין הערכים 39.81%-17.14% לאחר תנאי הקיץ, שהם ערכים זהים של 16.64-36.63% שהתקבלו לאחר תנאי אביב, וטווח ערכים של 5.75-39.60% בתנאי החורף.

ערכי משוואות רגרסיה אקספוננציאליות (שמתארת את הקשר בין משתנה בלתי תלוי למשתנה תלוי)

עבור תוצאות - גרף יעילות פוטו סינטטית של תאלוסי *Ulva* הם:

Y – מייצג משתנה תלוי, משתנה מוסבר (משוואה אקספוננציאלית, ערך פוטוסינטזה QY) מציג את הקשר בין X ל- Y .

X – מייצג משתנה בלתי תלוי (המשתנה המסביר עוצמת האור).

R^2 – מייצג את השונות המוסברת ע"י המשוואה (ככל שערכו גבוה יותר % מהשונות יותר מוסבר) מסביר את מגמת הירידה שניתן לראות בגרף שבאיור 27 לעיל.

$y = 0.3777e^{-0.002x}$ $R^2 = 0.9667$	משוואה מס' 4
--	--------------

$y = 0.3756e^{-0.002x}$ $R^2 = 0.9458$	נוסחה מס' 5 עבור נתוני הקיץ:
--	------------------------------

$y = 0.3548e^{-0.001x}$ $R^2 = 0.9501$	נוסחה מס' 6 עבור נתוני החורף:
--	-------------------------------

ניתן להסיק באופן גורף, כי פיזור הנקודות סביב הקו המייצג הוא קטן ביותר (כלומר המשוואה מסבירה את הנתונים בצורה טובה), כך שלמעשה אין הרבה שונות בין הנתונים.

5. דיון

5.1 פיתוח ריאקטור

פיתוח הריאקטור היה אתגר הנדסי וביולוגי, וגם מבחינת זמנים. בתום הפיתוח, ממדי הריאקטור ותאי הגידול מציעים העברת אור בצורה נגישה וטובה עם חסימה מינימלית של 1% מזכוכית הקולבה. ממצא זה נתמך במחקר על עבירות האור בתאי זכוכית ל-PBR (המעבירים מעל 90%) בניסויי "אוויר-חומר-אוויר",¹⁵⁷ לפיכך ב-PBR לא הייתה מגבלת אור לאצת *Ulva* אשר הצליחה לגדול. למרות האמור, מערכת PBR שפותחה במטרה לבצע סימולציות אופיינה בחיסרון ספציפי בתחום הדמיית שינוי כמויות הקרינה ברמה השעתית יומית. זאת מאחר שידוע כי כמות הקרינה החודרת למי הים משתנה ותלויה בזווית השמש, אשר באמצע היום כאשר השמש בזווית ישירה ממעל, יותר אור מצליח לחדור, ומאחר שישנו אפקט reflection של האור מפני הים אזי בזריחת השמש ובשקיעתה עד כמחצית מכמות האור יכולה להיות מוחזרת. שיפור בתחום זה יכול להיעשות אם הערכת הקרינה תהיה ממקור ימי ובצורה רציפה תוך כדי התחשבות באלמנט הבליעה והחזרה של האור בגוף המים.

מגבלה הנדסית בממשק הזרימה לתאים לא אפשרה הכנסה וגידול של מאקרו-אצה פר קולבה שבמשקל נמוך מ-150 מ"ג, אך לריאקטור פוטנציאל לתמוך בניסויים ארוכי טווח (ימים ומספר שבועות) החל ממשקל זה. בנוסף לכך, ריאקטור זה אינו מתאים לגידול מיקרו-אצות מאחר שגודלן הקטן עביר בצנרת הכניסה והיציאה מהקולבה, ולא ניתן להבטיח התיישבות קבועה שלהן בתוך התא המואר לסירוגין. בנוסף לכל האמור, מוצע לנסות ולהתגבר על הגבלת ימי הסימולציה במערכת (3 ימים) על מנת לבצע מחקר ומעקב המתפרשים לאורך זמן מקיף יותר שבועית, ואף חודשית – מה שעשוי לספק כמובן תוצאות נרחבות הכוללות סיכון זמן שהות ממושך. בסופו של דבר, עבור גידול מאקרו-אצות רחוק מהחוף יהיה צורך לפתח כלובי גידול גדולים ועמידים שימנעו רעיית דגים (ויגרמו להפחתת כמויות ביומסה) כדי להביא לידי יישום בים גידול בסדר גודל נרחב, בהתאם לעונה ולתנאים אשר הניבו תוצאות גדילה מרביות.

5.2 בחינת הריאקטור ככלי לביצוע סימולציות חורף אביב וקיץ

שילוב של תרחישים משופרים (תהליך האקלום וביצוע הסימולציה) הוביל אותנו להציע תהליך מותאם למענה על שאלת מחקר זה, לפיכך, ביצוע סימולציות שבסופן נצפו שינויים משמעותיים באחוזי הגדילה בין תנאי הקיצון (חורף לעומת קיץ). מתוך כלל המדגמים (40 אצות) רק שלושה מהם הראו תוצאות בלתי מייצגות של גדילה/איבוד ביומסה לכן, התוצאות שלנו מדגימות באופן סופי כי לאחר תקופת הרעבה של מאקרו-אצה *Ulva*, הוכחה גדילה תקינה ומתמשכת בפוטו-ביו ריאקטור בסימולציות של תנאי הים התיכון.

בנייתו הקשר בין ריכוזי חנקן לקצבי גידול בסימולציות לא ראינו שום קורלציה. לעומת זאת, התוצאות שלנו מראות שמתקיימת השפעה מובהקת של מכלול תנאי העונה על קצב הגדילה היחסי של האצות. ניתן לומר כי נתקבלה הערכה ראשונית לגידול רחוק מהחוף ביישום עתידי של העלאת מי עומק עשירים בדשן, תוך שימוש

בריאקטור, אשר תוצאותיה מראות יתרון משמעותי לגידול בים בעונת הקיץ, לעומת עונות האביב והחורף בהפרשים שנעו לטובת גידול בעונת הקיץ עבור שלושה ימי גידול בין 23.34% ל-40.01% בהתאמה.

5.3 השוואות תוצאות הגדילה של אצת *Ulva*

ישנם מעט מחקרים קודמים על קצבי גידול יומיים של מאקרו-אצת *Ulva* בגידול רחוק מהחוף (אינם מגיעים לקצב גידול יומי של 50%). במידע הספרותי הקיים לרוב אין עדות לביצוע תקופת אקלום מוגדרת לאצות בטרם ניסויי בחינת גדילה, תהליך שהוא חשוב להפחתת ריכוז החנקן הקודם בטרם הניסויים. תהליך זה חשוב והכרחי מאוד על מנת לענות על שאלת המחקר לגבי תחזית הגידול על פי פרמטרים באזור גאוגרפי מסוים. בהשוואת קצבי הגדילה של האצת בסימולציות שביצענו לאחר חלוקה יומית (DGR) לעומת הדיווחים שנמצאו בספרות נוכחנו לדעת, שקיבלנו תוצאות גדילה מקסימליות לעונת הקיץ של 34.42% לפולס חנקן בודד של 5.82 μM , כאשר דווח כבר בספרות כי טמפרטורה זו (25°C) היא אופטימלית לאצת *Ulva*.^{101,158} אנו משערים כי לטמפרטורה הגבוהה (27.17) היתה השפעה חיובית ומשמעותית על תוצאות הגדילה המקסימליות שהתקבלו לעונת הקיץ. ערכי הביניים בסימולציית תנאי האביב הניבו תוצאות גדילה של 26.64% לפולס חנקן של 16.48 μM , בעוד שתוצאות סימולציית תנאי החורף היו הנמוכים ביותר (21.08%) לפולס חנקן של 6.58 μM . יותר מסביר שטמפ' מי הגידול הנמוכות דוקא האטו את קצבי הגידול שנתקבלו לעונות החורף והאביב. ההבדל בין התוצאות אלו נובעות ככל הנראה בשל פער של 1.32 מעלות (לטובת עונת האביב) בתנאי הגידול, מה שהוביל לקליטה יותר טובה של חנקן (בעונת האביב-קצב הקליטה היה יותר יעיל מאשר בחורף). הסבר אלטרנטיבי הוא שבגלל ריכוז החנקן (שהיה משמעותית יותר גבוה באביב לעומת החורף) אז הטרנספורטרים פעלו בצורה יותר יעילה ולכן האצות גדלו יותר מהר באביב.

בנוסף לניסוי החורף בוצע ניסוי זהה, שבו ההבדל היחידי היה ביטול תחלופת המים בקולבות, דבר אשר השפיע על ריכוזי החנקן והזרחן אליהם נחשפה האצת, מאחר שבניסוי שלא כלל תחלופת מים ריכוזי חנקן וזרחן היו 7.24 ו-2.86E-01 בהתאמה, לעומת ניסויי המקור בסימולציית החורף שבהם ערכי החנקן והזרחן הכוללים היו 724.04 ו-28.61 (סך ריכוז במערכת ב μM) בהתאמה. התוצאות מניסוי זה הראו כי קצבי הגידול שהתקבלו היו מופחתים משמעותית בהשוואה לניסוי המקורי, שכלל תחלופת מים ועמד על ממוצע (DGR) של 10.27%, נתון אשר שיקף הבדל של 10.81% פחות (לכל יום) בהשוואה לניסוי המקורי (21.08%).

תוצאות סימולציית האביב אינן בנות השוואה לנמצא בספרות (26.64%), מאחר ולא תועד גידול האצת בים התיכון בעונה זו. אולם את תוצאות עונת החורף והקיץ ניתן להשוות לניסויים שתועדו בספרות משנערכו בצמוד לכלובי דגים (3 ק"מ רחוק מהחוף), קצב הגידול היומי (DGR) הוערך ב-11.7% לחודש נובמבר, ו-16.8% לחודש אוגוסט,¹²⁴ עם ערך DGR של 12% (ספטמבר-אוקטובר) לכלוב גידול המרוחק כ-45 מטרים ממתחם גידול הדגים.¹⁵⁹

גידול בכלובים באזור החוף רידינג בתל-אביב (ללא קרבה/קשר לכלובי דגים אך באזור עם ריכוז דשן גבוה) הניב DGRs מקסימלי בערכים של 17.6%-19.9 (מרץ-אפריל), בעוד שבגידול מעבדה תוך התעלמות

משינויים עונתיים ומתן תנאי נוטריינטים ותאורה בכמות אופטימלית ובלתי מגבילה, נסקו ערכי DGR ל-¹⁵⁴33%. למרות האמור לעיל, ישנן שתי סיבות עיקריות מדוע תוצאות הגדילה מהספרות (DGR) עבור מאקרו-אצה *Ulva* אינן בנות השוואה לחלוטין לעומת התוצאות השונות שקיבלנו במחקר זה. האחת היא שלרוב הנתונים מהספרות אינם מראים על תהליכי אקלום שבוצעו טרם ניסויי הגדילה השונים, כך שנקודת ההתחלה לריכוזי החנקן שבתא לא רק שלא הוערכה, אלא גם לא ירדה על מנת להסתגל לתנאים חדשים שעל בסיסם ייבחנו ויוערכו קצבי הגדילה, שכן ידוע כי תהליך הגידול גורם לירידת ריכוז החנקן בתא. הסיבה השנייה נעוצה בכך שבספרות מתארים גידול של *Ulva* בכלים וריאקטורים שונים, ובמגוון תנאים שונים בכל פעם, ואלו, כאמור, משפיעים על המטבוליזם של האצה בצורה שונה, שמגיבה בצורה שונה לקצב גידול הסופי. פערים מתודולוגיים כאלו קיימים ויוצרים סטיות תקן לעומת ניסויים אחרים (בתנאים מוגדרים).

5.4 השוואת סימולציה של עונת האביב לתוצאות מחוף רידינג בתל-אביב

ניסויי הסימולציה של עונת האביב (אפריל) בוצעו במעבדה עם נתונים זהים מותאמים (חנקן זרחן, וטמפ') לאלו שנמדדו בבדיקת מי קירור של חח"י (חברת חשמל ישראל תחנת רידינג), שם גודלו מאקרו-אצות בכלובים מרושתים בחלק העליון של עמודת המים.

השוואה בין תוצאות הגידול שנתקבלו במערכת PBR בסימולציה של עונת האביב (26.64%), לעומת תוצאות הגידול של האצה בכלובים ברידינג (9.8-17.6%) הראו הבדלים חיוביים מקסימליים הנעים בין 16.84% להבדלים מינימליים של 9.04%. את הפער בין התוצאות הללו ניתן להסביר בעקבות חשיפה מופחתת לאור בכלובי הגידול בשל צפיפות ביומסה גדולה לשטח נתון (הטלת צל), להבדיל מחשיפת האצות לאור מרבי בתאי הקולבה.

5.5 הערכת CHNS ואסימילציה

5.5.1 יחסי P/N

השפעת יחסי P:N שנבחנו במחקר זה במהלך הסימולציות נעו בין 1:25 (min) ל-1.47 (max), ואילו לפי ספרות המחקר והרקע התיאורטי היחס המקסימלי עבור גדילת מאקרו-אצה (יחס אופטימלי) ממוצע מוגדר כ- P:N 1:30 מתוך טווח הנע בין 1:10 ל-1:80¹⁶⁰. לפיכך, לא בוצעה חריגה בסימולציות מיחסים נורמטיביים אלו המשקפים יחס דרישה נמוך מאוד של זרחן לעומת חנקן, שכן ידוע כי קצב ספיחת פוספט באצת *Ulva* נמוך בכ-50% בשעות הלילה בהשוואה ליום.¹⁶⁰

5.5.2 ערכי חנקן באצות לאחר ביצוע סימולציות

בניסויים של מחקר זה נמנענו מהרעבת האצות עד למצב קיצון מחשש לגרימת "סטרוס" בשל חוסר בחנקן הכרחי, שעלול לגרום לאצה להתפורר תוך כדי האקלום או בהמשך, במהלך הסימולציות. אנו מצאנו במדידות המעבדה כי לאחר אקלום בן שבעה ימים מלאים בארלניימר (חשוף לאור שמש על בסיס יומי) ריכוז החנקן הפנימי הגיע לערך מינימלי של 1.74% DM, לעומת ערכים קריטיים עבור גדילה שנמצאו בספרות לאצה זו

(critical N= 2.17% DM)¹⁵², ואף נמוכים יותר כפי שתוארו קודם. ערכים בקרבת תוצאה זו אפשרו את המשך גדילת האצות לאחר תקופת האקלום, ובנוסף לכך התוצאות בסוף הסימולציות הראו קשר בין ריכוז החנקן החיצוני (שנכח במדיום) והפנימי אשר נמצא בערכי האחוזים הבאים: 2.39 ± 0.17 , 2.11 ± 0.02 , 2.00 ± 0.31 , $1.55\% \pm 0.48$ לעונות אביב, קיץ, חורף, חורף מיוחד, עם ערכי החציון: 2.3, 2.1, 1.9, 1.7 בהתאמה (%N of DW). להערכותינו מתוצאות אלו ניתן להסיק שהתאלוסים בניסויי החורף המיוחד היו מוגבלים בחנקן, התוצאה לבתום הסימולציה מעידות כי היו בטווחי "critical N", הן בגלל חוסר ערבוב והן בגלל ריכוז נמוך משמעותית בהשוואה ליתר הניסויים. מנגד לכך, שום אצה בשאר הניסויים לא הגיעה למצב רוויית חנקן לאחר אף לא אחת משלושת ימי הסימולציה. הערכים הגבוהים ביותר מיוחסים לתוצאות שהתקבלו לאחר סימולציית האביב, שם תחילה הוזנו האצות כזכור בכמות הגבוהה ביותר של חנקן מה שהשפיע באופן ישיר על הערך הסופי (%N of DW)-לאחר קליטה יעילה בטרנספורטרים שבממברנת התא. נדגיש כי במבחן T נמצא רק הבדל מובהק אחד בין עונת האביב לחורף המיוחד.

למרות שעל פי מבחן T נמצאה מובהקות בין צמד סימולציות יחיד, ורמת המובהקות (ANOVA-sig) שנתקבלה היא 5.4%, הערכים שקיבלנו מחזקים טענה שתוארה בספרות לפחות בשני מקורות (לגבי המינים *Ulva prolifera & lactuca*) כי ספיחת חנקן-ניטראט בתאלוס מושפעת באופן משמעותי וכמעט ישיר מערך הריכוז החיצוני (מדיום הסימולציות).^{161,162}

הערכת רמת החלבון מושפעת באופן ישיר מתוצאות ריכוז החנקן שנמצא, לפיכך התוצאות שהתקבלו זהות בסדרי הגודל שתוארו לחנקן. לכן הסתבר כי הסימולציה של עונת האביב הניבה את ההערכה הגבוהה ביותר לתכולת החלבון (13.36%), כמות זו נחשבת לנמוכה בהשוואה לנמצא בספרות לגבי מספר מיני *Ulva* (26%) לאחר גידול טבעי בים, אולם את זאת נאמר מתוך הסתייגות מאחר שהמדיום לא הוזן באמוניה. בהחרגת התוצאה שהתקבלה לאחר סימולציית "חורף מיוחד", התוצאות שהתקבלו נמצאות כולן בטווחים המוצגים בספרות לגנים של *Ulva* (חומר יבש 10%-26%).¹⁰³

5.5.3 ערכי פחמן ויחסי C/N

פרמטר זה נמצא כשופע במיוחד באצת *Ulva* ביחס לשאר הרכיבים שבדקנו (N, H, S). ערכי הפחמן שמצאנו הם: 29.12 ± 1 , 26.74 ± 0.28 , 24.45 ± 0.49 , 23.29 ± 2.60 עבור העונות: חורף מיוחד, אביב, קיץ, חורף בהתאמה (% of DW). תוצאות ערכי הפחמן לאחר "T test" הציגו את מספר הצירופים שמבין כלל הפרמטרים שנבחנו באנליזה שבהם נמצאה כמות ההבדלים המובהקים הגבוהה ביותר (סה"כ 4 קבוצות). בין צירופים אלו כל השוואה של עונת החורף המיוחד עם יתר העונות נמצאה סטטיסטית כשונה, כלומר הטיפול של עונה זו יצר תוצאות שונות במיוחד משאר סוגי הסימולציות. חשוב להזכיר כי באף לא אחד מהניסויים המדיום לא הועשר בצורה מלאכותית ב-CO₂.

יחסי C:N שנמצאו לאחר גידול האצות נעים בין 11~18 ומשקפים יחסי תוצאות זהים למדי (11.18-11.60) בסימולציות של העונות חורף, קיץ ואביב, אל מול תוצאה גבוהה משמעותית בניסוי החורף המיוחד

(18.77). ככלל, במאקרו-אצות נטען כי יחסים אלו נעים בין הטווחים 7.0–13.9%, אך נמצאו בספרות גם יחסים נמוכים מזה (6.4 עבור *Ulva flexuosa*).¹⁶³ במחקר שבדק השפעת ריכוזי חנקן שונים על ריכוז פחמן (DM) באצה לאחר שהייה בת 10 ימים נמצא כי בריכוז של $100 \mu\text{mol NH}_4^+$, ערכו של C (%) עמד על ערך גבוה משמעותית משנמצא במחקר זה, והיה 16438.13% .

5.5.4 ערכי גופרית ומימן

ערכי הגופרית שמצאנו הם: 5.5 ± 0.29 , 4.4 ± 0.74 , 4.0 ± 0.27 , 3.4 ± 0.60 עבור העונות: קיץ, חורף, אביב, חורף מיוחד בהתאמה (% of DW). ערכי המימן שמצאנו הם 5.2 ± 0.28 , 4.9 ± 0.29 , 4.6 ± 0.05 , 4.6 ± 0.26 עבור העונות: חורף מיוחד, אביב, קיץ, חורף, בהתאמה (% of DW).

בהשוואה של ערכי המימן בין הקבוצות, הטיפול (סימולציה) מסוג "חורף מיוחד" ככל הנראה השפיע מאוד, שכן נמצאו הבדלים מובהקים בינו לבין הטיפול של החורף הרגיל, ובינו לבין סימולציית תנאי הקיץ. טווחי הערכים של S ו-H שמצאנו לאחר הסימולציות השונות, נמצאו בספרות כאופייניים לאצת (*Ulva*) *Ulva* (*pertusa*) ועמדו על 3.47% DW sulfur (סימולציה מסוג "חורף מיוחד") לעומת 3.13% . וכמו כן בהשוואת ערכי המימן: 5.27% hydrogen DW (סימולציה מסוג "חורף מיוחד") לעומת 5.28 .¹⁶⁵ מחקר אחר (שבחן את תכולת מימן ב *Ulva flexuosa*) מצא אף ערך נמוך מזה שמצאנו לאחר הסימולציות, וערכו היה 3.8 ± 1.2 .¹⁶³ במחקרים נוספים (עבור *Ulva lactuca*) נמצא ערכו של S מעט נמוך לתוצאה אשר קיבלנו אך עדיין יחסית בערך קרוב 5.05 (לעומת 5.58 בסימולציית תנאי הקיץ).¹⁶⁶ נמצא כי הטווח שלו נע בין 1.34 ± 0.14 למקסימום של 5.75 ± 0.06 , ואילו עבור H נמצא כי הטווח שלו נע בין מינימום של 4.90 ± 0.08 למקסימום של 6.58 ± 0.10 .¹⁶⁷ עבור *Ulva rigida* ערכו של S נמצא נמוך משמעותית מכלל התוצאות שקיבלנו, ועמד על 2.3 ± 0.4 , ולעומתו ערכו של H נמצא קרוב יחסית לתוצאה שקיבלנו בסימולציה של החורף המיוחד, ועמד על 5.5 ± 1.03 .⁸³

5.6 פוטוסינתזה באצת *Ulva*

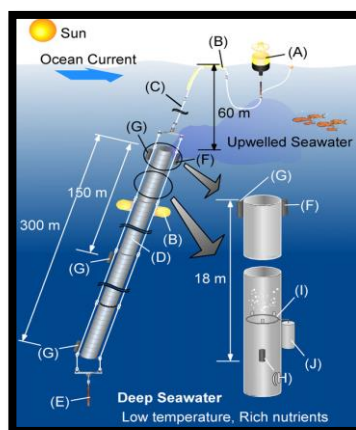
במחקר זה בחנו כיצד שהות בת שלושה ימים ב-PBR בתנאי סימולציות שונות משפיעה לאחר מכן על ערכי היעילות הפוטו-סינטטית של המין *Ulva*. מניתוח התוצאות אנו מבינים כי בשל הסינרגיה השונה של התנאים בטרם המדידות, ומאחר שלא ביצענו ניסויים תוך בידוד משתנה כזה או אחר, לא ניתן להצביע על פרמטר מסוים מתנאי הגידול אשר השפיע בצורה סבירה או משמעותית על ערכי QY, וזאת בשל הבדלים זניחים וחוסר השוואת בין הערכים (לא נמצאה מובהקות סטטיסטית) על פי עוצמות התאורה שבדקנו לאחר הסימולציה בעונות שנבחנו. לעומת זאת, בהשוואת ערכי ה-QY המקסימליים (לעוצמת אור 1.6) לקצבי הגדילה בשלוש העונות השונות נמצא קשר מסוים, והוא שככל שקצב הגדילה הממוצע (DGR) היה גבוה יותר, כך ערך ה-QY המקסימלי שנמדד היה גדול יותר גם כן. כך, לא ניתן לקבוע איזה פרמטר ספציפי השפיע/לא השפיע על קצב היעילות הפוטו-סינטטית, וכמו כן קשה לטעון כי האצות היו במצב "סטרס". השוואת הערכים המקסימליים של ערך QY, כפי שתוארו בפרק התוצאות אל מול הספרות במחקר משנת 2000,¹²⁹ משקפת תוצאות נמוכות

בהפרשים הנעים בין 0.21-0.29¹²⁹ הסבירות להבדלים אלה נובעת מערכים נמוכים של פולס אור אשר הוקרנו במחקר הנזכר בערך של 0.3 לעומת 1.6 במחקר הנוכחי.

5.7 העלאה מלאכותית של מי ים מהעומק

על מנת להגיע בגידולים בים לערכי DGR גבוהים יש להבטיח את היתכנות קיומם של כלל התנאים המגבילים ברמה מספקת או סבירה, ובדגש את ריכוזם של כמויות הדשן חנקן וזרחן, זאת מאחר שיש להם משמעות מכרעת על קצב הספיחה של האצה וקצב הגידול (באזור שבו השמש זמינה לפעילות פוטוסינתזה). מאחר שהים התיכון דל מאוד בפני השטח בדשנים (בעיקר באזורים הרדודים של האזור הפוטי), אי-ערבוב עמודת המים גורמת למי פני השטח להישאר דלים בדשנים. כך ניתן לשלב בחוות גידול אצות קונספט תשתיתי קיים של משאבה המעלה מים ממי העומק העשירים בדשנים לאזור הפוטי ולפני השטח, הזקוקים להיות בסביבת האצות ובזמן מספק כדי לשמור על צמיחתם ובכך לחסוך עלויות דישון. פעולה זו נדרשת מאחר שהראינו כי שכבת המקור התחתונה בים התיכון (בנקודות שנבחרו לניסויי הסימולציה) עשירה בחנקן וזרחן זמינים לתהליכי הפוטוסינתזה, ויישום של "artificial upwelling of deep sea water" הינו חשוב והכרחי לגידול מאקרו-אצות בחוות, אשר יגדיל בהכרח את הפרודוקטיביות הביולוגית באזור העליון של עמודת המים, ולמעשה תביא לקצבי גדילה גבוהים של מאקרו-אצה *Ulva*¹⁶⁸.

במחקר הנוכחי התבססנו על רעיון השאיבה המלאכותית, מאחר שביישום טכנולוגיה כזו ניתן יהיה ל"חזק" את תוצאות המחקר בשטח הטבעי לגידול האצות, בסקלה קטנה וגדולה כאחד, ובעיקר בהתאם לצפיפות הגידול של האצות בכלובים (כמות ביומסה לשטח) וגורמים נוספים, כגון מהירות זרימה ותנאי גלים ועונתיות. על כל פנים, תהליך כזה צריך להיות מבוקר, שכן העלאה יתרה של דשנים למי פני השטח עלולה לעורר למספר בעיות סביבתיות,¹⁶⁸ כפי שהרחבנו בפרק המבוא (אקוסיסטמה ימית וגידול אצות לביו-ריפיינרי ימי). **באור 28** להלן מובאת תמונה של משאבת העלאת מי העומק.



אור 28: משאבה להעלאת מי עומק להדגמה עבור גידול בים פתוח

A – מייצג מצוף עם GPS. **B** – מייצג כינון מצוף. **C** – מייצג חבל. **D** – מייצג צינור הזרמת המים עם ריכוז דשן גבוה
E – מייצג משקל למיצוב הצינור. מהעומק. **F** – מייצג רגש לריכוז פיגמנט כלורופיל. **G** – מייצג חיישן טמפר' מסוג "Bathythermograph" **H**. – מייצג חיישן מוליכות וטמפר'. **I** – משאבת אוויר. **J** – מייצג מנגנון הגז למשאבת האוויר.
 נלקח מאת.¹⁶⁸

*קיימות בספרות דוגמאות לסוגי משאבות ניסיוניות נוספות, עם/בלי צריכת חשמל ובתצורות הנדסיות שונות, אשר כולן בעלות אותה מטרה סופית.

מגבלה מרכזית של המחקר היא כי לא ניתן להעריך מתוצאות הניסויים לגבי גידול בקנה מידה גדול, אלא דווקא קטן מאחר שלא נבדק אלמנט צפיפות האצות בתנאי הגידול. אולם על פי הפרמטרים הנבדקים אנו טוענים כי מאגר מים גדול (כלי הקיבול) צריך להיות מעורבב היטב, שכן נמצאה חשיבות לשטף הדשן, שכן על סמך הנתונים בסימולציות ותוצאותיהן לא שהו האצות בתנאים מגבילים. תוצאות החורף והקיץ התקבלו, כאמור, ביישום תיאורטי של טכנולוגיה להעלאת מים מלאכותיים בים התיכון (AU), ולכן ניתן בעתיד ליישם באמצעותה את הממצאים של המחקר הנוכחי. בנוסף, ביצוע ניסויים המתחשבים ברמות צפיפויות שונות יכולות לתמוך בהמשך במחקר שמטרתו היא לבחון את הפרודוקטיביות בטווחי צפיפות ידועים על פני שטח ימי על בסיס התנאים הקיימים, תוך הנחה לשימוש ב AU, שכאמור פוטנציאלית יכול לפתור את הבעיה של פרודוקטיביות נמוכה מאוד שמאפיינת כיום שטחים גדולים בים.

למרות שפלטפורמת AU עשויה לפתור את הבעיה עבור הגידול באזור העליון של עמודת המים בתנאי הים התיכון, נשאלות השאלות האם חקלאות ימית נרחבת של *Ulva* תסיר את הסכום הכולל של החנקן שהועלה, ובמקרה שלא – עד כמה התערבות אנושית מעין זו תשפיע לרעה על אזור הגידול ובעלי החיים שבו. על מנת להשיב על שאלות אלו ברור למדי שמהירות הזרימה בצינור צריכה להיות מווסתת בהתאם להיקפי הגידול וגיל האצות, כשנקודת השאיבה שלו תמוקם בעומק ידוע, ותהיה לפי ריכוזי הדשן הנדרשים. בנוסף לכך, יש לבחון מספר משתנים, כדוגמת צפיפות הגידול ההתחלתית והסופית הצפויה בכלוב הגידול, ותדירות השימוש והספיקה המתקבלת מ-AU אשר צפויה להפרעות ודילול באזור הקיבול בשל גלים וזרמים המאופיינים באזור הנבדק. כידוע, השימוש במערכת כזאת מתבסס על העיקרון שבו כלל הביולוגיה מתרחשת באזור העליון של עמודת המים עד לעומק הפוטי. סיבה עיקרית ומוצקה לכך היא כמות האור המשמעותית המגיעה מעל לפני המים וחודרת אותם כתלות משתנה ברמת צלילות/עכירות המים. לפיכך, קונספט הפוך למימוש AU הוא להעביר אור ברמה מספקת לעומק מאות מטרים, שם כאמור נמצאים ריכוזי הדשן ברמה מספקת לגידול, וכאשר האור ישנו וזמין לתהליכי פוטוסינתזה אזי תיאורטית ניתן לגדל שם את האצות.

6. מגבלות המחקר והמלצות למחקר הבא

תוצאות ומסקנות המחקר הינם תולדה של ניסויים בקנה מידה קטן, בנוסף מימדי הקולכות הגבילו את פוטנציאל הגידול, (שבטווחי זמן גדולים יותר). בנוסף, ניסויים בעלי טווחי זמן גדולים יותר יתנו תמונה מלאה יותר על השפעת פולס הדשן על ההרכב הסופי של האצה, ולכן מומלץ יהיה למדוד גם את הפרמטרים: Ash, oxygen, שכידוע הרכב האצה כולל גם רכיבים אלו $(N\%+H\%+C+O\%+Ash\%+S\%)=100\%$. בנוסף, אנו משערים שלא מצאנו תמיד שונות (בפרק הערכת CHNS) בין הקבוצות/מדגמים מאחר ולא היו המון תצפיות באנליזות הספציפיות הללו. לסיכום, המשך מחקר זה צריך להתבסס לפי הצעדים הבאים: (1) ביצוע כמות נוספת של סימולציות בכדי לחזק את חלק מההשערות ובכך להגדיל את הוודאות לגביהם. (2) ביצוע סימולציות בתמהיל תנאים נוספים (שטרם נבחנו). (3) התגברות על מספר הגבלת מספר ימי הגידול וביצוע סימולציות ארוכות טווח מ 72 שעות. (4) החלפת תאי הגיול לקולכות בנפח גדול יותר. (5) מוצע לבדוק אסימילציה זהה של נוטריינטים (ושאר התנאים העונתיים) על גידול אצות בטווחי צפיפות שונים, ובתא שטח ידוע, זאת על מנת לבחון מה יהיה קצב גידול האצות לשטח ידוע ומוגדר.

7. סיכום ומסקנות

במחקר זה הוכח כי פוטו-ביו-ריאקטור הוא אכן כלי רלוונטי וחשוב המאפשר בידוד הגורמים השולטים בגידול מאקרו-אצות והבנתם, ולפיכך, התאפשר מענה על שאלת המחקר באמצעות ביצוע ניסויי גידול בתנאי סביבה עונתיים טיפוסיים (סימולציות) אשר בסופם התקבל בהצלחה אומדן לגידול ימי רחוק מהחוף עבור 72 שעות. המערכת אפשרה ביצוע סימולציה לתנאי גידול מגוונים, ואפשרות לשלוט בפרמטרים רבים ושונים ולהתאימם. מכאן שבאמצעותה ניתן לבצע ניסויים רבים ומגוונים נוספים שהשפעתם טרם נחקרה, אולם הוכח שהכלי הוא אלטרנטיבה מתאימה ונוחה לניסויי גידול מורכבים בשטח ימי בסקלה מעבדתית קטנה, כזו הדורשת הסדרת שטח מוקדמת מבחינה סטטוטורית לביצוע ניסויים דומים. תוצאות הגדילה של האצות במחקר זה הוכיחו אחוזי גדילה גבוהים במיוחד בעונת הקיץ, ובסיכום הסטטיסטי הכולל של שאר התוצאות ניתן להסיק כי האצות לא היו מוגבלות משמעותית בשום פרמטר.

בעבודה זו התגברתי על מכשולים הנדסיים וטכניים רבים. שלבי התכנון והקמת התשתית השלמה (לרבות בחינתה) ארכו זמן רב, ודרשו משאבים רבים שלא בהכרח עמדו לרשותינו. המערכת שנבנתה היתה הריאקטור הראשון שנבנה במעבדה, לצורכי גידול מאקרו – אצות ולכן, שלבי הבניה, חומר מקצועי ומדעי סייעו לסטודנטים נוספים שהגיעו בהמשך ללמוד במעבדה. התוצאות, המסקנות ושלל התוצרים שהופקו ממנה הפתיעו אותי לטובה.

ביבליוגרפיה

29. עינב, ר. אצות החוף של ישראל עמ' 35-36. אוניברסיטת בר אילן, (2004).
95. ד"ר אורית ברנע וענת צמל. היבטים ביולוגיים בתוכנית הימית לישראל (2005). זמין ב:
<https://msp-israel.net.technion.ac.il/%D7%A9%D7%9C%D7%91-%D7%90-%D7%90%D7%99%D7%A1%D7%95%D7%A3-%D7%94%D7%9E%D7%99%D7%93%D7%A2-%D7%94%D7%A7%D7%99%D7%99%D7%9D-%D7%95%D7%A0%D7%99%D7%AA%D7%95%D7%97%D7%95/>
120. עינב, ר. עינב, ר. אצות החוף של ישראל עמ' 38-39. אוניברסיטת בר אילן, (2004).
1. Lal, R. Feeding 11 billion on 0.5 billion hectare of area under cereal crops. *Food Energy Secur.* **5**, 239–251 (2016).
 2. Lehahn, Y., Ingle, K. N. & Golberg, A. Global potential of offshore and shallow waters macroalgal biorefineries to provide for food, chemicals and energy: Feasibility and sustainability. *Algal Res.* **17**, 150–160 (2016).
 3. Akella, A. K., Saini, R. P. & Sharma, M. P. Social, economical and environmental impacts of renewable energy systems. *Renew. Energy* **34**, 390–396 (2009).
 4. Fernand, F. *et al.* Offshore macroalgae biomass for bioenergy production: Environmental aspects, technological achievements and challenges. *Renew. Sustain. Energy Rev.* (2016).
 5. Gullison, R.E. *et al.* Tropical forests and climate policy. *Science* **316**, 985–986 (2007).
 6. Fedoroff N. V., *et al.* Radically rethinking agriculture for the 21st century. *Science* **327**, 833–834 (2010).
 7. Konda, N. V. S. N. M., Singh, S., Simmons, B. A. & Klein-Marcuschamer, D. An Investigation on the Economic Feasibility of Macroalgae as a Potential Feedstock for Biorefineries. *Bioenergy Res.* **8**, 1046–1056 (2015).
 8. Jung, K. A., Lim, S. R., Kim, Y. & Park, J. M. Potentials of macroalgae as feedstocks for biorefinery. *Bioresour. Technol.* **135**, (2013).
 9. Chung, I. K., Beardall, J. & Mehta, S. Using marine macroalgae for carbon sequestration : a critical appraisal, 877-886 (2011). *Appl. Phycol.*
 10. Sahoo, D., Elangbam, G. & Devi, S. S. Using algae for carbon dioxide capture and bio-fuel production to combat climate change. **42**, 32–38 (2012).
 11. Polikovsky, M. *et al.* Towards marine biorefineries: Selective proteins extractions from marine macroalgae *Ulva* with pulsed electric fields. *Innov. Food Sci. Emerg. Technol.* **37**, 194–200 (2016).

12. Chemodanov, A., Robin, A. & Golberg, A. Bioresource Technology Design of marine macroalgae photobioreactor integrated into building to support seagriculture for biorefinery and bioeconomy. *Bioresour. Technol.* **241**, 1084–1093 (2017).
13. Martins, I. & Marques, J. C. A Model for the Growth of Opportunistic Macroalgae (Enteromorpha sp.) in Tidal Estuaries. *Estuar. Coast. Shelf Sci.* **55**, 247–257 (2002).
14. Bruhn, A. *et al.* Bioenergy potential of *Ulva lactuca*: Biomass yield, methane production and combustion. *Bioresour. Technol.* **102**, 2595–2604 (2011).
15. Silva, M., Vieira, L., Almeida, A. P. & Kijjoo, A. The Marine Macroalgae of the Genus *Ulva* : Chemistry , Biological Activities and Potential Applications. **1**, 1–6 (2013).
16. Wolf, M. A., Sciuto, K., Andreoli, C. & Moro, I. WOLF M.A., SCIUTO K., ANDREOLI C. & MORO I. *Ulva* (Chlorophyta, Ulvales) biodiversity in the North Adriatic Sea (Mediterranean, Italy): cryptic species and new introductions. 48: 1510–1521. *J. Phycol.* **1521**, (2012).
17. Hiraoka M, Oka N Tank cultivation of *Ulva prolifera* in deep seawater using a new germling cluster method. 20:97–102 . *Appl Phycol* (2008).
18. Ben-Ari, T. *et al.* Management of *Ulva lactuca* as a biofilter of mariculture effluents in IMTA system. *Aquaculture* **434**, 493–498 (2014).
19. Mata, L., Schuenhoff, A. & Santos, R. A direct comparison of the performance of the seaweed biofilters , *Asparagopsis armata* and *Ulva rigida*. *Appl. Phycol.* 639–644 (2010).
20. Barry, A., Wolfe, A., English, C., Ruddick, C. & Lambert, D. *National Algal Biofuels Technology Review.* (2016).
21. Wei, N., Quarterman, J. & Jin, Y. S. Marine macroalgae: An untapped resource for producing fuels and chemicals. *Trends Biotechnol.* **31**, 70–77 (2013).
22. Rogers, K. *Rogers, K. Fungi, Algae and Protists. (Britannica Educational Publishing, Book).* (2011).
23. Leliaert, F. *et al.* Phylogeny and Molecular Evolution of the Green Algae. *CRC. Crit. Rev. Plant Sci.* **31**, 1–46 (2012).
24. Malta, E. J., Kamermans, P. & Draisma, S. Free-floating ulva in the southwest netherlands: Species or morphotypes? a morphological, molecular and ecological comparison. *Eur. J. Phycol.* **34**, 443–454 (1999).
25. Shimada, S., Yokoyama, N., Arai, S. & Hiraoka, M. Phylogeography of the genus

- Ulva (Ulvophyceae, Chlorophyta), with special reference to the Japanese freshwater and brackish taxa. *J. Appl. Phycol.* **20**, 979–989 (2008).
26. Svirski, E., Beer, S. & Friedlander, M. *Gracilaria conferta* and its epiphytes: (2) Interrelationship between the red seaweed and *Ulva* cf. *lactuca*. *Hydrobiologia* **260–261**, 391–396 (1993).
 27. Rautenberger, R. *et al.* Saturating light and not increased carbon dioxide under ocean acidification drives photosynthesis and growth in *Ulva rigida* (Chlorophyta). *Ecol. Evol.* **5**, 874–888 (2015).
 28. Axelsson L, Ryberg H, B. S. Two modes of bicarbonate utilization in the marine green macroalga *Ulva lactuca*. *Plant. Cell Environ.* **18**, 439–445 (1995).
 30. Alström-Rapaport, C., Leskinen, E. & Pamilo, P. Seasonal variation in the mode of reproduction of *Ulva intestinalis* in a brackish water environment. *Aquat. Bot.* **93**, 244–249 (2010).
 31. Wang, H. *et al.* The sporulation of the green alga *Ulva prolifera* is controlled by changes in photosynthetic electron transport chain. *Sci. Rep.* **6**, 1–9 (2016).
 32. Simmons, B. A. & Klein-marcuschamer, D. An Investigation on the Economic Feasibility of Macroalgae as a Potential Feedstock for Biorefineries. 1046–1056 (2015). doi:10.1007/s12155-015-9594-1
 33. Cherubini, F., Jungmeier, G., Germany, T. W. & Ireland, P. W. IEA Bioenergy Task 42 – Countries Report. 1-37 (2013).
 34. Cherubini, F. The biorefinery concept : Using biomass instead of oil for producing energy and chemicals. *Energy Convers. Manag.* **51**, 1412–1421 (2010).
 35. Jung, K. A., Lim, S. R., Kim, Y. & Park, J. M. Potentials of macroalgae as feedstocks for biorefinery. *Bioresour. Technol.* **135**, 182–190 (2013).
 36. Baghel, R. S. *et al.* production of biofuel and commodity chemicals. *Green Chem.* **17**, 2436–2443 (2015).
 37. Kostas, E. T., White, D. A. & Cook, D. J. Development of a bio-refinery process for the production of speciality chemical, biofuel and bioactive compounds from *Laminaria digitata*. *Algal Res.* **28**, 211–219 (2017).
 38. Baghel, R. S. *et al.* production of biofuel and commodity chemicals. *Green Chem.* **17**, 2436–2443 (2015).
 39. De Silva, S.S. Tropical Mariculture, Academic Press.(1992).
 40. Yang, X., Wu, X., Hao, H. & He, Z. Mechanisms and assessment of water eutrophication. *Journal of Zhejiang University SCIENCE B* **9**, 197–209 (2008).
 41. YiWen, P. *et al.* Pan Y, Fan W, Zhang D, Chen J, Huang H, Liu S, et al. Research

- progress in artificial upwelling and its potential environmental effects. *Sci China Earth Sci* **59**, 236–248 (2016).
42. Van Alstyne, K. L., Nelson, T. A. & Ridgway, R. L. Environmental chemistry and chemical ecology of ‘green tide’ Seaweed blooms. *Integr. Comp. Biol.* **55**, 518–532 (2015).
 43. Kim, J. K., Kraemer, G. P. & Yarish, C. Use of sugar kelp aquaculture in Long Island Sound and the Bronx River Estuary for nutrient extraction. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* **531**, 155–166 (2015).
 44. Buck, B. H. & Buchholz, C. M. The offshore-ring: A new system design for the open ocean aquaculture of macroalgae. *J. Appl. Phycol.* **16**, 355–368 (2004).
 45. De Casabianca, M. L., Barthelemy, N., Serrano, O. & Sfriso, A. Growth rate of *Ulva rigida* in different Mediterranean eutrophicated sites. *Bioresour. Technol.* **82**, 27–31 (2002).
 46. Cherubini, F. The biorefinery concept : Using biomass instead of oil for producing energy and chemicals. *Energy Convers. Manag.* **51**, 1412–1421 (2010).
 47. Sayre, R. Microalgae: The Potential for Carbon Capture. *Bioscience* **60**, 722–727 (2010).
 48. Alwis GMC, Jayaweera CD; Hydrilla verticella as a carbon capturing plant. roceedings of 16th International Forestry and Environment Symposium, A. G. A. G. & Boralesgamuwa, S. L. (2011).
 49. Hu, C. *et al.* On the recurrent *Ulva prolifera* blooms in the Yellow Sea and East China Sea. *J. Geophys. Res. Ocean.* **115**, 1–8 (2010).
 50. Levine, R. B., Pinnarat, T. & Savage, P. E. Biodiesel production from wet algal biomass through in situ lipid hydrolysis and supercritical transesterification. *Energy and Fuels* **24**, 5235–5243 (2010).
 51. Ugwu, C. U., Aoyagi, H. & Uchiyama, H. Photobioreactors for mass cultivation of algae. *Bioresour. Technol.* **99**, 4021–4028 (2008).
 52. Probst, Y. *A review of the nutrient composition of selected Rubus berries.* *Nutrition & Food Science* **45**, (2015).
 53. Rajkumar, R., Yaakob, Z. & Takriff, M. S. Potential of the micro and macro algae for biofuel production: A brief review. *BioResources* **9**, 1606–1633 (2014).
 54. Stévant, P., Rebours, C. & Chapman, A. Seaweed aquaculture in Norway: recent industrial developments and future perspectives. *Aquac. Int.* **25**, 1373–1390 (2017).
 55. Neori, A., Cohen, I. & Gordin, H. *Ulva lactuca* Biofilters for Marine Fishpond

- Effluents II. Growth Rate, Yield and C:N Ratio. *Bot. Mar.* **34**, 483–490 (1991).
56. Abdel-Raouf, N., Al-Homaidan, A. A., & Ibraheem, I. B. M. Microalgae and wastewater treatment. *Saudi J. Biol. Sci.* **19**, 257–275 (2012).
 57. El-Sikaily, A., Nemr, A. El, Khaled, A. & Abdelwehab, O. Removal of toxic chromium from wastewater using green alga *Ulva lactuca* and its activated carbon. *J. Hazard. Mater.* **148**, 216–228 (2007).
 58. Probst, Y. *A review of the nutrient composition of selected Rubus berries.* *Nutrition & Food Science* **45**, (2015).
 59. Paiva, L., Lima, E., Neto, A. I., Marcone, M. & Baptista, J. Nutritional and Functional Bioactivity Value of Selected Azorean Macroalgae: *Ulva compressa*, *Ulva rigida*, *Gelidium microdon*, and *Pterocladia capillacea*. *J. Food Sci.* **82**, 1757–1764 (2017).
 60. Mišurcová, L., Machů, L. & Orsavová, J. Seaweed minerals as nutraceuticals. *Adv. Food Nutr. Res.* **64**, 371–390 (2011).
 61. McHugh, D. J. *A Guide to the Seaweed Industry.* *FAO Fisheries Technical Paper* (2003).
 62. Nisizawa, K., Noda, H., Kikuchi, R. & Watanabe, T. The main seaweed foods in Japan. *Hydrobiologia* **151–152**, 5–29 (1987).
 63. Smit, A. J. Medicinal and pharmaceutical uses of seaweed natural products: A review. *J. Appl. Phycol.* **16**, 245–262 (2004).
 64. To, C., Security, F. & All, N. F. O. R. *THE STATE OF WORLD FISHERIES AND AQUACULTURE.* (2016).
 65. MacArtain, P; Gill, CIR; Brooks, M; Campbell, R; Rowland, IR. Nutritional value of edible seaweeds. *Nutr Rev* 2007, 65, 535–543. Special Article. *Library (Lond)*. **2007**, 1734–1739 (1996).
 66. Wells, M. L. *et al.* Algae as nutritional and functional food sources: revisiting our understanding. *J. Appl. Phycol.* **29**, 949–982 (2017).
 67. Kumar, S. A., Magnusson, M., Ward, L. C., Paul, N. A. & Brown, L. Seaweed supplements normalise metabolic, cardiovascular and liver responses in high-carbohydrate, high-fat fed rats. *Mar. Drugs* **13**, 788–805 (2015).
 68. Sharifuddin, Y., Chin, Y. X., Lim, P. E. & Phang, S. M. Potential bioactive compounds from seaweed for diabetes management. *Mar. Drugs* **13**, 5447–5491 (2015).
 69. Lordan, S., Ross, R. P. & Stanton, C. Marine bioactives as functional food ingredients: Potential to reduce the incidence of chronic diseases. *Mar. Drugs* **9**,

- 1056–1100 (2011).
70. Tabarsa, M., Rezaei, M., Ramezanzpour, Z. & Waaland, J. R. Chemical compositions of the marine algae *Gracilaria salicornia* (Rhodophyta) and *Ulva lactuca* (Chlorophyta) as a potential food source. *J. Sci. Food Agric.* **92**, 2500–2506 (2012).
 71. Norambuena, F. *et al.* Algae in fish feed: Performances and fatty acid metabolism in juvenile Atlantic Salmon. *PLoS One* **10**, 1–17 (2015).
 72. Kut Güroy, B., Cirik, Ş., Güroy, D., Sanver, F. & Tekinay, A. A. Effects of *Ulva rigida* and *Cystoseira barbata* meals as a feed additive on growth performance, feed utilization, and body composition of Nile tilapia, *Oreochromis niloticus*. *Turkish J. Vet. Anim. Sci.* **31**, 91–97 (2007).
 73. Bolton, J. J., Robertson-Andersson, D. V., Shuuluka, D. & Kandjengo, L. Growing ulva (chlorophyta) in integrated systems as a commercial crop for abalone feed in South africa: A swot analysis. *J. Appl. Phycol.* **21**, 575–583 (2009).
 74. Viera, M. P. *et al.* Suitability of three red macroalgae as a feed for the abalone *Haliotis tuberculata coccinea* Reeve. *Aquaculture* **248**, 75–82 (2005).
 75. Melillo, J. M. *et al.* Indirect emissions from biofuels: How important? *Science* (80- .). **326**, 1397–1399 (2009).
 76. Bonusreport, H. S. Biodiesel : a renewable and Reprinted from : Biodiesel : a renewable and biodegradable fuel New US specification ensures product identity and quality for biodiesel. *Hydrocarb. Process.* (2006).
 77. Jones, C. S. & Mayfield, S. P. Algae biofuels: Versatility for the future of bioenergy. *Curr. Opin. Biotechnol.* **23**, 346–351 (2012).
 78. Goh, C. S. & Lee, K. T. A visionary and conceptual macroalgae-based third-generation bioethanol (TGB) biorefinery in Sabah, Malaysia as an underlay for renewable and sustainable development. *Renew. Sustain. Energy Rev.* **14**, 842–848 (2010).
 79. Chen, H., Zhou, D., Luo, G., Zhang, S. & Chen, J. Macroalgae for biofuels production: Progress and perspectives. *Renew. Sustain. Energy Rev.* **47**, 427–437 (2015).
 80. Milledge, J. J., Smith, B., Dyer, P. W. & Harvey, P. Macroalgae-derived biofuel: A review of methods of energy extraction from seaweed biomass. *Energies* **7**, 7194–7222 (2014).
 81. Fernand, F. *et al.* Offshore macroalgae biomass for bioenergy production: Environmental aspects, technological achievements and challenges. *Renew.*

- Sustain. Energy Rev.* **75**, 35–45 (2017).
82. Rajkumar R, Yaakob Z, T. M. P. of the micro and macro algae for biofuel production: a brief review. *B. 2014*;9:1606–33. *global. BioResources* **9**, 1606–1633 (2014).
 83. Korzen, L., Pulidindi, N., Israel, A., Abelson, A. & Gedanken, A. RSC Advances Single step production of bioethanol from the seaweed *Ulva rigida* using sonication †. *RSC Adv.* **5**, 16223–16229 (2015).
 84. Biber, P. D., Harwell, M. a. & Cropper, W. P. Modeling the dynamics of three functional groups of macroalgae in tropical seagrass habitats. *Ecol. Modell.* **175**, 25–54 (2004).
 85. Herut, Almogi-Labin, Jannink, and Gertman. ‘The Seasonal Dynamics of Nutrient and Chlorophyll a Concentrations on the SE Mediterranean Shelf-slope.’ *Oceanologica Acta* 23.7,771-82: (2000).
 86. Nixon, S. W. Replacing the Nile: Are anthropogenic nutrients providing the fertility once brought to the Mediterranean by a great river? *Ambio* **32**, 30–39 (2003).
 87. Krom, M. D., Herut, B. & Mantoura, R. F. C. Nutrient budget for the Eastern Mediterranean: Implications for phosphorus limitation. *Limnol. Oceanogr.* **49**, 1582–1592 (2004).
 88. Gertman, I. & Hecht, A. Annual and long-term changes in the salinity and the temperature of the waters of the South-eastern Levantine Basin. *Track. long-term Hydrol. Chang. Mediterr. Sea* **16**, 75–78 (2002).
 89. Hamad, N., Millot, C. & Taupier-letage, I. A new hypothesis about the surface circulation in the eastern basin of the mediterranean sea. **66**, 287–298 (2005).
 90. Stambler N., The Mediterranean Sea – Primary Productivity. In: Goffredo S., Dubinsky Z. (eds) *The Mediterranean Sea*. Springer, Dordrecht (2014).
 91. Krom, M. D., Emeis, K. C. & Van Cappellen, P. Why is the Eastern Mediterranean phosphorus limited? *Prog. Oceanogr.* **85**, 236–244 (2010).
 92. Herut B. and all scientific group of IOLR, National Institute of Oceanography (2016). The National Monitoring Program of Israel’s Mediterranean waters – Scientific Report for 2015, IOLR Report H42/2016. Available at: <http://www.sviva.gov.il/infoservices/r>. 73–74 (2016).
 93. Cornell, S., Rendell, A. & Jickells, T. Atmospheric inputs of dissolved organic nitrogen to the ocean. *Nature* **376**, 243–246 (1995).
 94. Herut B., Shefer E., Gordon N., Galil B., Tibor G., Tom M., Rilov G. and

- Silverman J. (2012). The National Monitoring Program of Israel's Mediterranean coastal waters – Scientific Report for 2011, IOLR Report H78/2012. 28-2 (2012).
96. Krom, M. D., Kress, N., Brenner, S. & Gordon, L. I. Phosphorus Limitation of Primary Productivity in the Eastern Mediterranean-Sea. *Limnol. Oceanogr.* **36**, 424–432 (1991).
 97. Krom, M. D., Herut, B. & Mantoura, R. F. C. Nutrient budget for the Eastern Mediterranean: implication for phosphorus limitation. *Limnol. Oceanogr.* **49**, 1582–1592 (2004).
 98. Kress, N., Gertman, I. & Herut, B. Temporal evolution of physical and chemical characteristics of the water column in the Easternmost Levantine basin (Eastern Mediterranean Sea) from 2002 to 2010. *J. Mar. Syst.* **135**, 6–13 (2014).
 99. Lobban, C. S. & Harrison, P. J. 1994. S. E. and P. & Cambridge University Press, Cambridge, 366 pp. Reviews. *Seaweed Ecol. Physiol.* 563–567 (1997).
 100. Hein, M., Pedersen, M.F., Sand-Jensen, K., Size-dependent nitrogen uptake in micro- and macroalgae. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 118, 247 – 253 (1995).
 101. Taylor, R.B., Peek, J.T.A., Rees, T.A.V., Scaling of ammonium uptake by seaweeds to surface area: volume ratio: geographical variation and the role of uptake by passive diffusion. *Mar. Ecol.: Prog. Ser.* 169, 143–148 (1998).
 102. Río, M. J., Ramazanov, Z. & García-Reina, G. *Ulva rigida* (Ulvales, Chlorophyta) tank culture as biofilters for dissolved inorganic nitrogen from fishpond effluents. *Hydrobiologia* **326–327**, 61–66 (1996).
 103. Fleurence, J. Seaweed proteins: Biochemical, nutritional aspects and potential uses. *Trends Food Sci. Technol.* **10**, 25–28 (1999).
 104. Msuya, F. E. & Neori, A. Effect of water aeration and nutrient load level on biomass yield, N uptake and protein content of the seaweed *Ulva lactuca* cultured in seawater tanks. *J. Appl. Phycol.* **20**, 1021–1031 (2008).
 105. Harrison, P. J. & Hurd, C. L. Nutrient physiology of seaweeds: Application of concepts to aquaculture. *Cah. Biol. Mar.* **42**, 71–82 (2001).
 106. Fernand, F. *et al.* Offshore macroalgae biomass for bioenergy production: Environmental aspects, technological achievements and challenges. *Renew. Sustain. Energy Rev.* **75**, 35–45 (2017).
 107. Hole, W. The role of nitrogen status in regulating ammonium transient uptake and nitrogen storage by macroalgae. **92**, 283–301 (1985).
 108. Pérez-Mayorga, D. M. *et al.* Nitrogen uptake and growth by the opportunistic macroalga *Ulva lactuca* (Linnaeus) during the internal tide. *J. Exp. Mar. Bio. Ecol.*

- 406, 108–115 (2011).
109. Neveux, N. *et al.* Biocrude yield and productivity from the hydrothermal liquefaction of marine and freshwater green macroalgae. *Bioresour. Technol.* **155**, 334–341 (2014).
 110. Fleurence, J. Seaweed proteins: Biochemical, nutritional aspects and potential uses. *Trends in Food Science and Technology*, 10, 25–28 (1999).
 111. Neori, A., Msuya, F.E., Shauli, L., Schuenhoff, A., Kopel, F., Shpigel, M., 2003. A novel three-stage seaweed (*Ulva lactuca*) biofilter design for integrated mariculture. *J. Appl. Phycol.* 15, 543 – 553.
 112. Barbarino, E. & Lourenço, S. O. An evaluation of methods for extraction and quantification of protein from marine macro-and microalgae. *Journal of Applied Phycology* **17**, 447–460 (2005).
 113. Angell, A. R. & Mata, L. The protein content of seaweeds : a universal nitrogen-to-protein conversion factor of five The protein content of seaweeds : a universal nitrogen-to-protein conversion factor of five. (2015).
 114. Peu, P. *et al.* Sulphur fate and anaerobic biodegradation potential during co-digestion of seaweed biomass (*Ulva* sp.) with pig slurry. *Bioresour. Technol.* **102**, 10794–10802 (2011).
 115. Dynamics, A. N. Chapter 3. Managing Algal Productivity. *Managing* 16–35 (1978).
 116. Gordillo, F. J. L., Figueroa, F. L. & Niell, F. X. Photon- and carbon-use efficiency in *Ulva rigida* at different CO₂ and N levels. *Planta* **218**, 315–322 (2003).
 117. Lüning, K. Day and night kinetics of growth rate in green, brown and red seaweeds. *Journal of Phycology* **28**, 794–803 (1992).
 118. Hyun-woung S, Celia M. Smith. characterization of light harvesting pigment in spots of *ulva fasciata*. 11(3):309-315, *Journal of Phycology*. (1996).
 119. Martins, I., Oliveira, J. M., Flindt, M. R. & Marques, J. C. The effect of salinity on the growth rate of the macroalgae *Enteromorpha intestinales* (Chlorophyta) in the Mondega estuary (west Portugal). *Acta Oecologica* **20**, 259–265 (1999).
 121. Choi, T. S., Kang, E. J., Kim, J. & Kim, K. Y. Effect of salinity on growth and nutrient uptake of. **25**, 17–26 (2010).
 122. Lüning, K. & Pang, S. Mass Cultivation of Seaweed: Current Aspects and Approaches. *J. Appl. Phycol.* **15**, 115–119 (2003).
 123. Naldi, M. & Viaroli, P. Nitrate uptake and storage in the seaweed *Ulva rigida* C. Agardh in relation to nitrate availability and thallus nitrate content in a eutrophic

- coastal lagoon (Sacca di Goro, Po River Delta, Italy). *J. Exp. Mar. Bio. Ecol.* **269**, 65–83 (2002).
124. Korzen, L., Abelson, A. & Israel, A. Growth, protein and carbohydrate contents in *Ulva rigida* and *Gracilaria bursa-pastoris* integrated with an offshore fish farm. *J. Appl. Phycol.* **28**, 1835–1845 (2016).
 125. Alsufyani, T., Weiss, A. & Wichard, T. Time course exo-metabolomic profiling in the green marine macroalga *Ulva* (Chlorophyta) for identification of growth phase-dependent biomarkers. *Mar. Drugs* **15**, (2017).
 126. Carr, H. & Björk, M. A methodological comparison of photosynthetic oxygen evolution and estimated electron transport rate in tropical *Ulva* (Chlorophyceae) species under different light and inorganic carbon conditions. *J. Phycol.* **39**, 1125–1131 (2003).
 127. Beer, S. & A. Eshel. Photosynthesis of *Ulva* sp. I. Effects of desiccation when exposed to air. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, **70**, 91–97(1983).
 128. Björkman, O. & Demmig, B. Photon yield of O₂ evolution and chlorophyll fluorescence characteristics at 77 K among vascular plants of diverse origins. *Planta* **170**, 489–504 (1987).
 129. Cabello-Pasini, A., Aguirre-von-Wobeser, E. & Figueroa, F. Photoinhibition of photosynthesis in *Macrocystis pyrifera* (Phaeophyceae), *Chondrus crispus* (Rhodophyceae) and *Ulva lactuca* (Chlorophyceae). *J. Photochem. Photobiol.* **57**, 169–178 (2000).
 130. Schreiber, U. & Neubauer, C. O₂-dependent electron flow, membrane energization and the mechanism of non-photochemical quenching of chlorophyll fluorescence. *Photosynth. Res.* **25**, 279–293 (1990).
 131. Critchley, A. & M. Ohno,. *Seaweed Resources of the World. Japan International Cooperation Agency (JICA), Tokyo (1998).*
 132. Morrissey, K., Hynes, S., Cuddy, M. & O’Donoghue, C. Irish Macroalgae Industry; Netalgae: County Cork, Ireland,. (2011).
 133. P. Pérez-López, C. Jeffryes, S.N. Agathos, G. Feijoo, G. Rorrer, M.T. Moreira Environmental life cycle optimization of essential terpene oils produced by the macroalga *Ochtodes secundiramea* *Sci. Total Environ.*, **542** (Part A), pp. 292-305 (2016).
 134. Roesijadi, G., Jones, S. B. & Zhu, Y. Macroalgae as a Biomass Feedstock : A Preliminary Analysis. *Analysis* 1–50 (2010).

135. Rote, J., Hays, D. & Benemann, J. Topic Paper 12 Macroalgae (Seaweeds). *Natl. Pet. Counc.* (2012).
136. Murphy, F., Devlin, G., Deverell, R. & McDonnell, K. Biofuel production in ireland-an approach to 2020 targets with a focus on algal biomass. *Energies* **6**, 6391–6412 (2013).
137. Roesijadi, G., Jones, S. B. & Zhu, Y. Macroalgae as a Biomass Feedstock : A Preliminary Analysis. *Analysis* 1–50 (2010).
138. Reith, H., Huijgen, W. & Hal, J. van. Seaweed potential in the Netherlands. *ECN Biomass, Coal* (2009).
139. Borowitzka, M. A. Commercial production of microalgae: ponds, tanks, tubes and fermenters. *J. Biotechnol.* **70**, 313–321 (1999).
140. Anderson RA (ed) *Algal culturing techniques*, *Phycological Society of America. Elsevier Academic, USA, p 578* (2005).
141. Pérez-López, P. *et al.* Environmental solutions for the sustainable production of bioactive natural products from the marine sponge *Crambe crambe*. *Sci. Total Environ.* **475**, 71–82 (2014).
142. Rorrer, G. L. & Cheney, D. P. Bioprocess engineering of cell and tissue cultures for marine seaweeds. *Aquac. Eng.* **32**, 11–41 (2004).
143. Ahmed, A. B. A. & Taha, R. M. Current Trends and Future Prospects of Biotechnological Interventions Through Plant Tissue Culture in Seaweeds. *Handb. Mar. Macroalgae Biotechnol. Appl. Phycol.* 431–440 (2011).
144. Pérez-López, P. *et al.* Environmental life cycle optimization of essential terpene oils produced by the macroalga *Ochtodes secundiramea*. *Sci. Total Environ.* **542**, 292–305 (2016).
145. Ratchford, A. J. & Fallowfield, H. J. Performance of a flat plate , air-lift reactor for the growth of high biomass algal cultures. 1–9 (1992).
146. Pyszniak, A. M. & Gibbs, S. P. *Phaeodactylum tricornutum*. *Protoplasma* 208–217 (1992).
147. Hu, Q., Guterman, H. & Richmond, A. A flat inclined modular photobioreactor for outdoor mass cultivation of photoautotrophs. *Biotechnol. Bioeng.* **51**, 51–60 (1996).
148. Sánchez Mirón, A., García Camacho, F., Contreras Gómez, A., Grima, E. M. & Chisti, Y. Bubble-column and airlift photobioreactors for algal culture. *AIChE J.* **46**, 1872–1887 (2000).
149. Mirón, A. S., Gómez, A. C., Camacho, F. G., Grima, E. M. & Chisti, Y.

- Comparative evaluation of compact photobioreactors for large-scale monoculture of microalgae. *Prog. Ind. Microbiol.* **35**, 249–270 (1999).
150. Holdt, S. L., Christensen, L. & Iversen, J. J. L. A novel closed system bubble column photobioreactor for detailed characterisation of micro- and macroalgal growth. *J. Appl. Phycol.* **26**, 825–835 (2014).
 151. Rorrer, G. L. & Mullikin, R. K. Modeling and simulation of a tubular recycle photobioreactor for macroalgal cell suspension cultures. *Chem. Eng. Sci.* **54**, 3153–3162 (1999).
 152. Pedersen, M. F. & Borum, J. Nutrient control of algal growth in estuarine waters. Nutrient limitation and the importance of nitrogen requirements. *Oceanogr. Lit. Rev.* **44**, 315 (1997).
 153. Pedersen MF., Transient ammonium uptake in the macroalga *Ulva lactuca* L. (Chlorophyta): nature, regulation, and the consequences for choice of measuring technique. *J Phycol* 30:980-986 (1994) .
 154. Chemodanov, A. *et al.* Net primary productivity, biofuel production and CO₂ emissions reduction potential of *Ulva* sp. (Chlorophyta) biomass in a coastal area of the Eastern Mediterranean. *Energy Convers. Manag.* **148**, 1497–1507 (2017).
 155. Reproductive Phenology and Growth of *Gracilaria tikvahiae* McLachlan (Gigartinales, Rhodophyta) in the Great Bay Estuary, New Hampshire . *Botanica Marina* **29**, 147 (1986).
 156. Cabello-Pasini A, Figueroa FL. Effect of nitrate concentration on the relationship between photosynthetic oxygen evolution and electron transport rate in *Ulva rigida* (Chlorophyta). *J Phycol* 41:1169–1177 (2005).
 157. SCHOTTS. How to choose the correct tubing material for photobioreactor. (2016).
 158. Henley WJ. Growth and photosynthesis Of *Ulva rotundata* (Chlorophyta) as a function of temperature and square wave irradiance in indoor culture. *J Phycol* ;28:625–34 (1992).
 159. L. Korzen, I.N. Pulidindi, A. Israel, A. Abelson, A. Gedanken, Marine integrated cul- ture of carbohydrate rich *Ulva rigida* for enhanced production of bioethanol, *RSC Adv.* **5**, 59251–59256 (2015).
 160. Hurd CL. physiological ecology of nutrient uptake by intertidal furoid algae. PhD Thesis, the Queen’s University of Belfast, 243 pp (1990).
 161. Sun, K. M. *et al.* Responses of *Ulva prolifera* to short-term nutrient enrichment under light and dark conditions. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* **163**, 56–62 (2015).

162. Neveux, N. *et al.* Biocrude yield and productivity from the hydrothermal liquefaction of marine and freshwater green macroalgae. *Bioresour. Technol.* **155**, 334–341 (2014).
163. Nielsen, M. M. *et al.* Cultivation of *Ulva lactuca* with manure for simultaneous bioremediation and biomass production. *J. Appl. Phycol.* **24**, 449–458 (2012).
164. Nielsen M, Bruhn A, Rasmussen M, Olesen B, Larsen M, et al. Cultivation of *Ulva lactuca* with manure for simultaneous bioremediation and biomass production. *J Appl Phycol* 1–10 (2011).
165. Lee, S. Y., Chang, J. H. & Lee, S. B. Chemical composition, saccharification yield, and the potential of the green seaweed *Ulva pertusa*. *Biotechnol. Bioprocess Eng.* **19**, 1022–1033 (2014).
166. Bikker, P. *et al.* Biorefinery of the green seaweed *Ulva lactuca* to produce animal feed, chemicals and biofuels. *J. Appl. Phycol.* 1–15 (2016). doi:10.1007/s10811-016-0842-3
167. Mhatre, A. *et al.* Effect of multiple product extractions on bio-methane potential of marine macrophytic green alga *Ulva lactuca*. *Renew. Energy* **132**, 742–751 (2019).
168. Vollenweider, R. A. Coastal marine eutrophication: principles and control. in *Marine Coastal Eutrophication* 1–20 (Elsevier, 1992).

נספחים

הפוטו-ביו ריאקטור הורכב מחלקים רבים. אלו מצויינים ומפורטים בנספח מס' 1.
נספח מספר 1: טבלת חלקים בצורת המערכת



תמונה:	מידות ונפח:	שם חלק ומטרה:	סימול החלק:
	קוטר 11 מ"מ חיצוני, פנימי 8 מ"מ	מחבר צורת Y	1
	קוטר חיצוני 9 מ"מ, קוטר פנימי 5 מ"מ	מחבר T מפלסטיק	2
	7-10 מ"מ קוטר חיצוני 7 מ"מ בקצה הרחב 10 מ"מ, קוטר פנימי 3 מ"מ	ברז PP עשוי פוליפרופילן	3
	קוטר חיצוני 13 מ"מ, קוטר פנימי 10 מ"מ	ברז לצינור טפטוף קוטר 16 או 20 מ"מ	4
	קוטר חיצוני קוטר פנימי מ"מ	ברז כדורי 3/4" מנחושת ידית ארגונומית (פנים חוץ)	5
	קוטר חיצוני 24 (זכר), קוטר חיצוני 32 מ"מ (נקבה) קוטר פנימי 11 מ"מ (זרימה בפועל)	ברז פלסטיק 3/4" צול	6
	קוטר חיצוני 42 מ"מ (כניסה), קוטר פנימי 36 מ"מ, עובי הזכוכית הוא 3 מ"מ.	קולבה בנפח 1 ליטר (מקסימלי)	7
	מ"מ 44.6 ג מ"מ 15X36.4 43.6	פקק גומי אדום לסגירת קולבה	8
		1-1503 טבעת שע"מ 120 מ"מ	9

סימול החלק:	שם חלק ומטרה:	מידות ונפח:	תמונה:
10	צינור פוליאתילן כניסה ויציאה -קולבות	קוטר פנימי 6 מ"מ, קוטר חיצוני 8 מ"מ.	
11	צינור פוליאתילן כניסה למסעף ראשי	קוטר חיצוני 12 מ"מ, קוטר פנימי 10 מ"מ.	
12	מפצל מים -מסעף 45° ביציאה מהמשאבה	קוטר חיצוני מ"מ, קוטר פנימי מ"מ.	
13	ברך 90° - תבריג שת לסיפון.	קוטר חיצוני מ"מ, קוטר פנימי מ"מ.	
14	צינור כניסה לצ'ילר	קוטר חיצוני מ"מ, קוטר פנימי מ"מ.	
15	צינור יציאה אפור ממיכל עליון	קוטר חיצוני מ"מ, קוטר פנימי מ"מ.	
16	מיכל אספירטור תחתון	נפח 100 ליטר, עם ברז יציאה בקוטר חיצוני, ופנימי .	
17	מיכל פוליאתילן שחור	נפח 100 ליטר, יציאה לברז 3/4"	

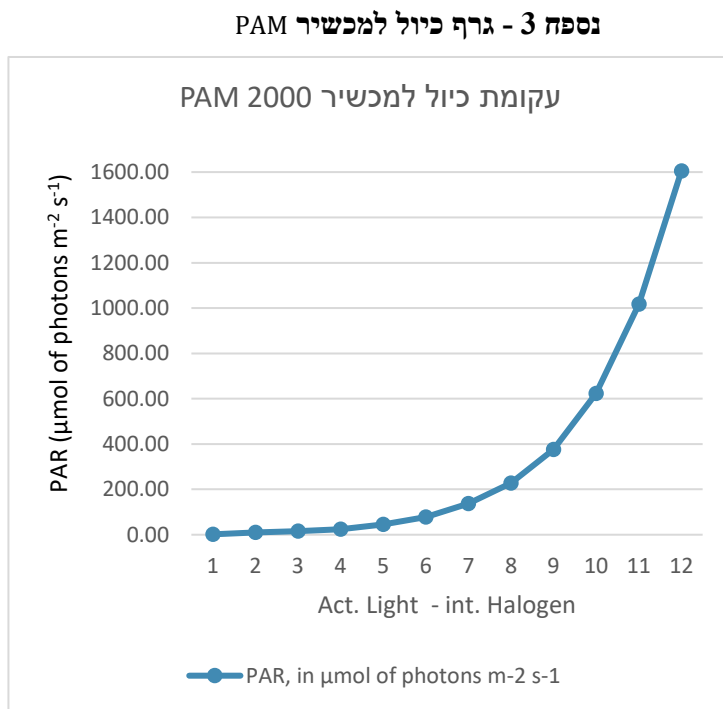
רכיבים חשמליים בפוטו-ביו ריאקטור פורטו בטבלה של נספח מס' 2.

נספח מספר 2: טבלת רכיבים חשמליים במערכת PBR

תמונה:	חברה ודגם:	שם חלק ומטרה:	סימול חלק:
	<p>צ'ילר מדגם W25 של חברת WH (כולל פאנל שליטה).</p>	<p>הצ'ילר לצורך קירור/חימום מים, מותאם לכמות מים שאינה עולה על 1 קוב. פיקוד המאפשר שליטה בטמ"פ המים בטווחים של 5~35 C° (בקפיצות של 0.1 C°). צריכת חשמל AC V 220.</p>	18
	<p>דגם TOP 2 LA של חברת "pedrollo". צריכת חשמל 230 V A 2.0. קוטר יציאת הצינור: צול ורבע "ג". לציין את הספיקה לגובה הנתון.</p>	<p>משאבה טבולה עם מצוף לסגירת מעגל</p>	19
	<p>חברת Nanolux , og series - warless version</p>	<p>משנק דיגיטלי המפעיל נורת 600W עם מספר מצבים ע"פ מצב עמעם (דימר). 4 מצבי העמעם הם: 75%, 50%, super lux, 100%, (תוספת של 10%).</p>	20
		<p>רפלקטור כנפיים הולנדי עם בית מנורה, מחזיר כמעט 100% מהאור.</p>	21
	<p>חברת SolisTek (Digital Grow Lamp).</p>	<p>מנורה לצורך גידול metal halide lamp 600w</p>	22

		<p>טיימר אנלוגי-שעון שבת כולל זיזים, לצורך תזמון ON-OFF התאורה. כל זיז שווה 15 דקות, שקע תקע.</p>	<p>23</p>
	<p>חברת S Boyu.</p>	<p>משאבת אוויר 510 Aquarium Air Pump יציאה 4 ליטר לדקה.</p>	<p>24</p>

בטרם בוצעו ניסויים עם מכשיר ה PAM 2000, בוצע בו כיול לעוצמות התאור השונות. גרף הכיול מופיע בנספח מס' 3.



רגישות וערכי סטייה למכשיר Light Sensor logger של חברת LI COR

רגישות: בדרך כלל כ-7 μA (עבור כל; 1,000 μmol s⁻¹ m⁻²) למדידות המתבצעות במים.
 סטייה: מקסימלית כ 1% (עד ל 10,000 μmol s⁻¹ m⁻²)

גודל הסנסור כדורי "AIR BALL" של מכשיר Light Sensor logger :

Globe: 6.1 cm diameter("2.4)

Housing: 3.18 cm diameter("1.25)

Overall Height: 10.7 cm("4.2)

טבלת תוצאות מדידת שטף פוטונים

שם ניסוי/מספר תא:	ממוצע קרינה בתאים:	תא מספר 1:	תא מספר 2:	תא מספר 3:	תא מספר 4:	תא מספר 5:
זווית 0 מעלות, מצב 50%	112.2	87.5	122.2	108.2	125.0	117.9
זווית של 0 מעלות, מצב 75%	259.0	207.1	273.3	231.3	281.3	301.8
זווית של 0 מעלות, מצב 100%	575.1	451.8	651.0	481.7	615.3	675.9
זווית של 45 מעלות, מצב 50%	107.6	101.0	121.1	94.5	114.4	107.2
זווית של 45 מעלות, מצב 75%	273.5	253.3	310.2	241.1	280.5	282.3
זווית של 45 מעלות, מצב 100%	633.4	591.1	712.5	578.7	666.0	619.0
זווית של 90 מעלות, מצב 50%	113.0	101.6	132.3	97.4	127.5	106.1
זווית של 90 מעלות, מצב 75%	289.3	261.1	322.3	271.8	315.5	275.6
זווית של 90 מעלות, מצב 100%	653.2	558.7	769.3	588.6	712.9	636.3
זווית של 0 מעלות, מצב super lux	690.7	615.8	709.9	696.2	709.0	722.8
זווית של 45 מעלות, מצב super lux	714.5	649.4	744.7	640.1	788.6	749.7
זווית של 90 מעלות, מצב super lux	803.3	709.6	827.9	724.4	914.9	839.8

נספח 4: מבחני המשך-מימן
Multiple Comparisons

Dependent Variable: H(%)

	i) Season	j) Season	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.	95% Confidence Interval	
						Lower Bound	Upper Bound
Tukey HSD	Winter	Summer	-.0	.2	.987	-.7	.5
		Spring	-.2	.2	.539	-.9	.3
		Special Winter	-.6	.2	.052	-1.2	.0
	Summer	Winter	.0	.2	.987	-.5	.7
		Spring	-.2	.2	.720	-.8	.4
		Special Winter	-.5	.2	.082	-1.2	.0
	Spring	Winter	.2	.2	.539	-.3	.9
		Summer	.2	.2	.720	-.4	.8
		Special Winter	-.3	.2	.344	-1.0	.2
	Special Winter	Winter	.6	.2	.052	-.0	1.2
		Summer	.5	.2	.082	-.0	1.2
		Spring	.3	.2	.344	-.2	1.0
Scheffe	Winter	Summer	-.0	.2	.990	-.7	.6
		Spring	-.2	.2	.609	-.9	.4
		Special Winter	-.6	.2	.075	-1.3	.0
	Summer	Winter	.0	.2	.990	-.6	.7
		Spring	-.2	.2	.772	-.9	.4
		Special Winter	-.5	.2	.115	-1.2	.1
	Spring	Winter	.2	.2	.609	-.4	.9
		Summer	.2	.2	.772	-.4	.9
		Special Winter	-.3	.2	.416	-1.0	.3
	Special Winter	Winter	.6	.2	.075	-.0	1.3
		Summer	.5	.2	.115	-.1	1.2
		Spring	.3	.2	.416	-.3	1.0
LSD	Winter	Summer	-.0	.2	.754	-.5	.4
		Spring	-.2	.2	.202	-.7	.1
		Special Winter	-.6	.2	.013	-1.1	-.1
	Summer	Winter	.0	.2	.754	-.4	.5
		Spring	-.2	.2	.319	-.6	.2
		Special Winter	-.5	.2	.021	-1.0	-.1
	Spring	Winter	.2	.2	.202	-.1	.7
		Summer	.2	.2	.319	-.2	.6
		Special Winter	-.3	.2	.111	-.8	.1
	Special Winter	Winter	.6	.2	.013	.1	1.1
		Summer	.5	.2	.021	.1	1.0
		Spring	.3	.2	.111	-.1	.8

*. The mean difference is significant at the 0.05 level.

נספח 5: מבחני המשך-הגנן

Multiple Comparisons

Dependent Variable: N

	(i) Season	(j) Season	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.	95% Confidence Interval	
						Lower Bound	Upper Bound
Tukey HSD	winter	Summer	-.1	.2	.969	-.9	.6
		Spring	-.3	.2	.459	-1.1	.4
		Special Winter	.4	.2	.328	-.3	1.2
	Summer	winter	.1	.2	.969	-.6	.9
		Spring	-.2	.2	.701	-1.0	.5
		Special Winter	.5	.2	.184	-.2	1.3
	Spring	winter	.3	.2	.459	-.4	1.1
		Summer	.2	.2	.701	-.5	1.0
		Special Winter	.8	.2	.040	.0	1.6
	Special Winter	winter	-.4	.2	.328	-1.2	.3
		Summer	-.5	.2	.184	-1.3	.2
		Spring	-.8	.2	.040	-1.6	-.0
Scheffe	winter	Summer	-.1	.2	.977	-.9	.7
		Spring	-.3	.2	.532	-1.2	.4
		Special Winter	.4	.2	.399	-.4	1.3
	Summer	winter	.1	.2	.977	-.7	.9
		Spring	-.2	.2	.756	-1.1	.5
		Special Winter	.5	.2	.240	-.3	1.4
	Spring	winter	.3	.2	.532	-.4	1.2
		Summer	.2	.2	.756	-.5	1.1
		Special Winter	.8	.2	.059	-.0	1.7
	Special Winter	winter	-.4	.2	.399	-1.3	.4
		Summer	-.5	.2	.240	-1.4	.3
		Spring	-.8	.2	.059	-1.7	.0
LSD	winter	Summer	-.1	.2	.669	-.6	.4
		Spring	-.3	.2	.162	-.9	.1
		Special Winter	.4	.2	.105	-.1	1.0
	Summer	winter	.1	.2	.669	-.4	.6
		Spring	-.2	.2	.304	-.8	.3
		Special Winter	.5	.2	.053	-.0	1.1
	Spring	winter	.3	.2	.162	-.1	.9
		Summer	.2	.2	.304	-.3	.8
		Special Winter	.8	.2	.010	.2	1.4
	Special Winter	winter	-.4	.2	.105	-1.0	.1
		Summer	-.5	.2	.053	-1.1	.0
		Spring	-.8	.2	.010	-1.4	-.2

*. The mean difference is significant at the 0.05 level.

נספח 6: מבחני המשך-חלבוך

Multiple Comparisons

Dependent Variable: Val

	(I) Season	(J) Season	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.	95% Confidence Interval	
						Lower Bound	Upper Bound
Tukey HSD	Winter	Summer	-.6	1.3	.969	-5.0	3.8
		Spring	-2.1	1.3	.459	-6.6	2.3
		Special Winter	2.5	1.3	.328	-1.9	7.0
	Summer	Winter	.6	1.3	.969	-3.8	5.0
		Spring	-1.5	1.3	.701	-5.9	2.9
		Special Winter	3.1	1.3	.184	-1.2	7.6
	Spring	Winter	2.1	1.3	.459	-2.3	6.6
		Summer	1.5	1.3	.701	-2.9	5.9
		Special Winter	4.6	1.3	.040	.23	9.1
	Special Winter	Winter	-2.5	1.3	.328	-7.0	1.9
		Summer	-3.1	1.3	.184	-7.6	1.2
		Spring	-4.6	1.3	.040	-9.1	-2
Scheffe	Winter	Summer	-.6	1.3	.977	-5.4	4.2
		Spring	-2.1	1.3	.532	-7.0	2.7
		Special Winter	2.5	1.3	.399	-2.3	7.4
	Summer	Winter	.6	1.3	.977	-4.2	5.4
		Spring	-1.5	1.3	.756	-6.3	3.3
		Special Winter	3.1	1.3	.240	-1.7	8.0
	Spring	Winter	2.1	1.3	.532	-2.7	7.0
		Summer	1.5	1.3	.756	-3.3	6.3
		Special Winter	4.6	1.3	.059	-1.7	9.5
	Special Winter	Winter	-2.5	1.3	.399	-7.4	2.3
		Summer	-3.1	1.3	.240	-8.0	1.7
		Spring	-4.6	1.3	.059	-9.5	.1
LSD	Winter	Summer	-.6	1.3	.669	-3.8	2.5
		Spring	-2.1	1.3	.162	-5.3	1.0
		Special Winter	2.5	1.3	.105	-.6	5.7
	Summer	Winter	.61	1.3	.669	-2.5	3.8
		Spring	-1.5	1.3	.304	-4.7	1.6
		Special Winter	3.1	1.3	.053	-.0	6.3
	Spring	Winter	2.1	1.3	.162	-1.0	5.3
		Summer	1.5	1.3	.304	-1.6	4.7
		Special Winter	4.6	1.3	.010	1.4	7.9
	Special Winter	Winter	-2.5	1.3	.105	-5.7	.6
		Summer	-3.1	1.3	.053	-6.3	.0
		Spring	-4.6	1.3	.010	-7.9	-1.4

-. The mean difference is significant at the 0.05 level.

נספח 7: מבחני המשך-פחמן

Multiple Comparisons

Dependent Variable: C

	(I) Season	(J) Season	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.	95% Confidence Interval	
						Lower Bound	Upper Bound
Tukey HSD	winter	Summer	-1.1	1.1	.756	-4.8	2.5
		Spring	-3.4	1.1	.070	-7.1	.2
		Special Winter	-5.8	1.1	.005	-9.5	-2.1
	Summer	winter	1.1	1.1	.756	-2.5	4.8
		Spring	-2.2	1.1	.274	-6.0	1.4
		Special Winter	-4.6	1.1	.016	-8.4	-.9
	Spring	winter	3.4	1.1	.070	-.2	7.1
		Summer	2.2	1.1	.274	-1.4	6.0
		Special Winter	-2.3	1.1	.247	-6.1	1.3
	Special Winter	winter	5.8	1.1	.005	2.1	9.5
		Summer	4.6	1.1	.016	.9	8.4
		Spring	2.3	1.1	.247	-1.3	6.1
Scheffe	winter	Summer	-1.1	1.1	.804	-5.2	2.9
		Spring	-3.4	1.1	.100	-7.5	.61
		Special Winter	-5.8	1.1	.007	-9.8	-1.7
	Summer	winter	1.1	1.1	.804	-2.9	5.2
		Spring	-2.2	1.1	.341	-6.3	1.7
		Special Winter	-4.6	1.1	.025	-8.7	-.6
	Spring	winter	3.4	1.1	.100	-.6	7.5
		Summer	2.2	1.1	.341	-1.7	6.3
		Special Winter	-2.3	1.1	.311	-6.4	1.6
	Special Winter	winter	5.8	1.1	.007	1.7	9.8
		Summer	4.6	1.1	.025	.6	8.7
		Spring	2.3	1.1	.311	-1.6	6.4
LSD	winter	Summer	-1.1	1.1	.349	-3.8	1.5
		Spring	-3.4	1.1	.018	-6.1	-.7
		Special Winter	-5.8	1.1	.001	-8.5	-3.1
	Summer	winter	1.1	1.1	.349	-1.5	3.8
		Spring	-2.2	1.1	.084	-4.9	.3
		Special Winter	-4.6	1.1	.004	-7.3	-1.9
	Spring	winter	3.4	1.1	.018	.7	6.1
		Summer	2.2	1.1	.084	-.3	4.9
		Special Winter	-2.3	1.1	.074	-5.0	.2
	Special Winter	winter	5.8	1.1	.001	3.1	8.5
		Summer	4.6	1.1	.004	1.9	7.3
		Spring	2.3	1.1	.074	-2	5.0

*. The mean difference is significant at the 0.05 level.

נספח 8: מבחני המשך-גופרית

Multiple Comparisons

Dependent Variable: S(%)

	i) Season	j) Season	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.	95% Confidence Interval	
						Lower Bound	Upper Bound
Tukey HSD	Winter	Summer	-1.1	.4	.104	-2.4	.2
		Spring	.4	.4	.767	-.9	1.7
		Special Winter	.9	.4	.182	-.3	2.3
	Summer	Winter	1.1	.4	.104	-.2	2.4
		Spring	1.5	.4	.026	.1	2.9
		Special Winter	2.1	.4	.005	.7	3.4
	Spring	Winter	-.4	.4	.767	-1.7	.9
		Summer	-1.5	.4	.026	-2.9	-.1
		Special Winter	.5	.4	.584	-.8	1.9
	Special Winter	Winter	-.9	.4	.182	-2.3	.3
		Summer	-2.1	.4	.005	-3.4	-.7
		Spring	-.5	.4	.584	-1.9	.8
Scheffe	Winter	Summer	-1.1	.4	.143	-2.6	.3
		Spring	.4	.4	.813	-1.0	1.8
		Special Winter	.9	.4	.237	-.5	2.4
	Summer	Winter	1.1	.4	.143	-.3	2.6
		Spring	1.5	.4	.040	.0	3.0
		Special Winter	2.1	.4	.008	.6	3.5
	Spring	Winter	-.4	.4	.813	-1.8	1.0
		Summer	-1.5	.4	.040	-3.0	-.0
		Special Winter	.5	.4	.651	-.9	2.0
	Special Winter	Winter	-.9	.4	.237	-2.4	.5
		Summer	-2.1	.4	.008	-3.5	-.6
		Spring	-.5	.4	.651	-2.0	.9
LSD	Winter	Summer	-1.1	.4	.028	-2.1	-.1
		Spring	.4	.4	.358	-.5	1.3
		Special Winter	.9	.4	.052	-.0	1.9
	Summer	Winter	1.1	.4	.028	.1	2.1
		Spring	1.5	.4	.006	.5	2.5
		Special Winter	2.1	.4	.001	1.1	3.0
	Spring	Winter	-.4	.4	.358	-1.3	.5
		Summer	-1.5	.4	.006	-2.5	-.5
		Special Winter	.5	.4	.228	-.4	1.5
	Special Winter	Winter	-.9	.4	.052	-1.9	.0
		Summer	-2.1	.4	.001	-3.0	-1.1
		Spring	-.5	.4	.228	-1.5	.4

*. The mean difference is significant at the 0.05 level.

Abstract

Israel is a densely populated country that encourages a long-term process of population growth. At the same time, the country maintains a stable economy that yields a growing domestic product (GDP) at a rate exceeding the population growth. While Israel's population grows, and the GDP per capita and the per capita income increase, there is also a steady increase in the demand for food and in the import of oil for transport, as well as for the production of energy and chemicals. In addition, the demand for residential areas and workplaces consistently increases. Therefore, in order to fulfill these demands and maintain the country's development, it is recommended to find innovative solutions beyond the traditional agricultural areas. The potential of Israel's maritime zone to be used for algal aquaculture can reduce the pressures on soil resources. The country's exclusive economic zone (EEZ) area, which is ~¹24% larger than its terrestrial area, has not yet been explored and exploited.

In spite of the above-mentioned potential and advantages, implementation of the maritime cultivation of algae poses many challenges. First, the continuous research of open-water algal cultivation is a difficult task, since it involves various logistic aspects and requires many infrastructures (adjusted vessels, marinas, equipment, and growing cages), and others that do not yet exist. In addition, the high financial expenses, including the cost of many work hours and manpower, are a major obstacle. Therefore, based on current monitoring data, the optimal conditions for growing *Ulva* macroalgae offshore (where and during which season?) remain unknown, as well as whether the existing environmental conditions, both physical and biochemical, allow for high biomass growth rates in the epipelagic zones of the Mediterranean Sea. Another challenge to be overcome is the substantially low macronutrient concentrations in the Mediterranean, mainly in the upper water column, which is a limiting factor in the cultivation of macroalgae. These and other factors render the maritime zone a complex system and an area with a variable potential for promotion of a blue economy. Since it is hard and complex to study the maritime zone, it is not yet being used to supply a sustainable source of infrastructure for macroalgal cultivation.

* Maritime zone potential, as assessed by the Natural Resources Administration (Israeli Ministry of Energy)

The main aim of this study was to find a solution for the above-mentioned challenges and to conduct a small-scale growth assessment according to the conditions found in the Mediterranean Sea. Thus, a local strain of the *Ulva* macroalgae (Chlorophyta), which inhabits the Mediterranean, was used in the current study. To simulate Mediterranean Sea conditions, a novel in-situ photobioreactor was developed as part of this thesis project, and used to inspect how Influence of different light intensities and macro-nutrient concentration (relevant to the Mediterranean region) affects daily growth rates (DGR), algae biochemical composition (CHNS), and other physiological parameters such as tracer visibility monitoring, and photosynthetic efficacy. In this study, we hypothesize that it will be possible to perform AU (artificial upwelling) of deep nutrient-rich water to the surface; therefore, these conditions will be implemented in the simulations in order to exploit the high concentrations of macronutrients in the depths for best algal growth and to reduce fertilization costs.

Main findings:

A total of nine three-day simulations were performed using the photobioreactor developed by us. These simulations provided growth rates (DGR), with a maximum of $34\pm 24\%$ during summer (average \pm SD), with the use of fertilizers from a depth of 500 m; and nitrogen and phosphorus concentrations of 5.82 and 0.22 ($\mu\text{mol/l}$), respectively after simulation lighting level of 259 PAR $\mu\text{mol of photons m}^{-2} \text{ s}^{-1}$. Median data yielded 26 ± 20 during spring, with surface water conditions; and nitrogen and phosphorus concentrations of 92.86 and 1.93 ($\mu\text{mol/l}$), respectively after simulation lighting level of 259 PAR $\mu\text{mol of photons m}^{-2} \text{ s}^{-1}$. Minimal data of approximately $21\pm 7\%$ were achieved during winter, with the use of fertilizers from a depth of 460 m; and nitrogen and phosphorus concentrations of 6.58 and 0.26 ($\mu\text{mol/l}$), respectively after simulation lighting level of 112 PAR $\mu\text{mol of photons m}^{-2} \text{ s}^{-1}$.

Pulse-amplitude modulation (PAM) measurements revealed a predicted reverse correlation between increasing light intensity in darkened leaves and quantum yield values, though no significant effect of the various treatments on photosynthetic efficacy quantum yield (QY) was found. The maximum values of the photosynthetic efficiency (Φ) obtained, ranged from 0.4 to 0.49.

The relative protein content of algae following simulations (average \pm SD), was 8.67 \pm 2.72, 11.22 \pm 1.78, 11.83 \pm 0.15, and 13.36 \pm 0.98 (% of DW) with the following median values: 9.7, 10.8, 11.8, 13.3, for the seasons special winter (Without circulation), winter, summer, and spring, respectively.

The nitrogen concentrations in the final dry biomass were estimated to be 1.55 \pm 0.48, 2.00 \pm 0.31, 2.11 \pm 0.02, and 2.39 \pm 0.17 (% of DW) with the following median values: 1.7, 1.9, 2.1, 2.3, for the seasons special winter, winter, summer, and spring, respectively.

After examining the effects of all conditions on seaweed in the reactor, we estimate that seaweeds were not limited to available nitrogen concentrations for growth (except for the simulation in which there was no water circulation). In the spring-season simulation, the nitrogen absorption rate was found to be most efficient, since the initial nitrogen concentration was 15 times higher than in the winter-season simulation.

In summary, in order to investigate how much marine biomass we can grow offshore, we developed a method for growing seaweed in a laboratory, Combined with certain sea conditions for a defined season, with emphasis on limiting nutrient data (based on values at different depths far offshore). In the future, it will be possible to raise the nutrient-rich deep water by the AU and, thus, overcome the challenge of low nutrient concentrations. The results of this work present a new method and tools for assessing the potential of marine space for the growth of biomass for food, chemical, and biofuel purposes.

החוג ללימודי הסביבה
ביה"ס לסביבה ולמדעי כדור
הארץ ע"ש פורטר
הפקולטה למדעים מדויקים
ע"ש ריימונד וברלי סאקלר



**Simulations of the effects of offshore environmental conditions on
macro-alga *Ulva* spp biomass growth, for bioenergy and food
applications**

This paper was submitted as the thesis for the M.Sc. degree

By:

Noam Rosiansky

This study was carried out under the supervision of:

Dr. Alex Golberg, Porter School of Environmental Studies, Tel Aviv University

Dr. Alexandra Chudnovsky, faculty of exact sciences, Air-O lab Tel Aviv University

Dr. Yoav Lehahn, School of Marine Sciences, Haifa University

Date: May 2019