



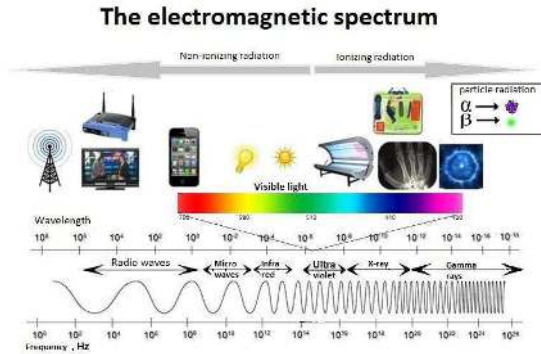
## מאמר ראשון בסדרה: תאורה באקווריום צמחיה- מבוא

ד"ר גל הרצוג<sup>1</sup>

<sup>1</sup>סנפירים- חוות גידול דגי נוי, מושב גני טל, 08-9957774

Snapirimfarm@gmail.com

הוגש לפרסום: 1/06/21



תמונה 1: סוגים שונים של גלים אלקטרומגנטיים (מתוך האתר של אוניברסיטת ברנ

<https://www.uib.no/en/hms-portalen/75292/electromagnetic-spectrum>

### קליטת אור ע"י צמחים

צמחים קולטים אנרגיית אור והופכים אותה לאנרגיה כימית, המשמשת אותם לגדילה, בתהליך המכונה פוטוסינתזה. תפקידו המרכזי של הפוטון, אותה יחידה של אנרגיית האור, הוא לספק את האנרגיה הדרושה בהעברת אלקטרונים מהמים (H<sub>2</sub>O) ולהזרמת האנרגיה לטובת בידוד הפחמן (C) מפחמן דו חמצני (CO<sub>2</sub>) ותוך כך, ליצור סוכר (גלוקוז). תוצר הלוואי של התהליך הוא חמצן (O<sub>2</sub>), הנפלט לאטמוספירה ומשמש לנשימה. כיוון שבתהליך הנשימה, נצרך חמצן ונפלט פחמן דו חמצני, בעוד בתהליך הפוטוסינתזה, נקלט פחמן דו חמצני ונפלט חמצן, ניתן לראות את התהליכים כהופכיים ומשלימים זה את זה.

### הקדמה: גלים אלקטרומגנטיים

הרדיו לו אנו מאזינים בנסיעה ברכב, צילומי הרנטגן שביצענו לגב התחתון, אור השמש, השליטה בטלוויזיה באמצעות השלט, התקשורת בטלפון הנייד ואף מידע המגיע אלינו מלוויינים, כולם מבוססים על גלים אלקטרומגנטיים. אוסף כלל הגלים הללו, בכלל התדרים והאורכים, מכונה: הספקטרום האלקטרומגנטי. אך מה מבדיל גלי רדיו, מגלים אלקטרומגנטיים המשמשים לצילומי רנטגן, או לחימום במיקרוגל, למשל?

נהוג לחלק את הספקטרום האלקטרומגנטי לתחומים, בעיקר ע"פ אורך הגל ותדירותו. גלי רדיו, למשל, הם בעלי תדירות נמוכה ביותר ואורך גל אופייני של מטרים ועד קילומטרים. מן העבר האחר של הספקטרום, נמצאת קרינת הרנטגן (קרינת X), שאורכה אנגסטרומים\* בודדים ותדירותה גבוהה ביותר.

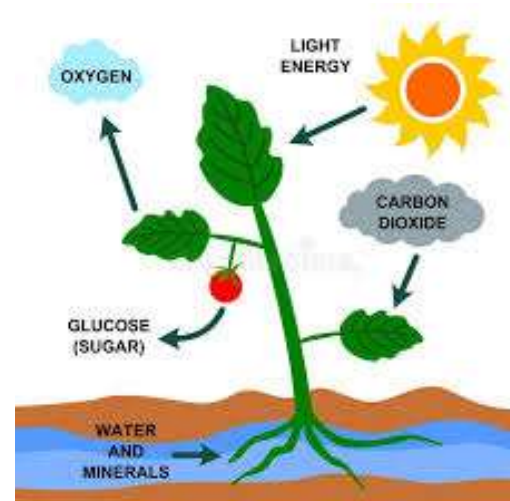
במאמר זה, אנו נתמקד באזור בספקטרום המכונה: 'תחום הנראה'. תחום זה נמצא בטווח הגלים האלקטרומגנטיים באורך 380-740 ננומטר\*\* (nm) וניתן לזהותו בעיין אנושית. גלים בתחום הנראה, יוצרים למשל את מגוון צבעי הקשת שאנו רואים בשמים. נזכיר כי מינים רבים של בעלי חיים וצמחים, מסוגלים לזהות גם קרינה אלקטרומגנטית המצויה מחוץ לטווח הראיה של העיין האנושית.

\* אנגסטרום היא יחידת מידה לאורכים מזעריים. <sup>1</sup> אנגסטרום = 10<sup>-10</sup> של מטר או 0.000000001 מטר

\*\* ננומטר היא יחידת מידה לאורכים מזעריים. <sup>1</sup> ננומטר = 10<sup>-9</sup> של מטר או 0.000000001 מטר

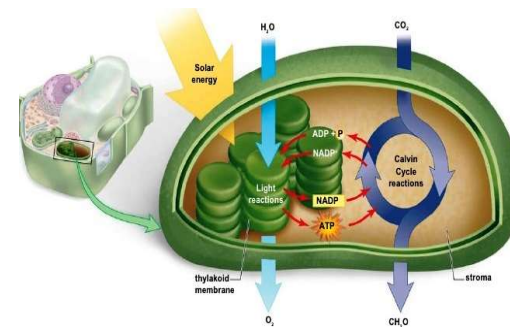
חלבונים אשר בליבו נמצא 'מרכז הראקציה'. המרכז מורכב בעיקר ממולקולות כלורופיל, אליהן צמוד חלבון המאפשר להם תנועה לכיוון האור ('אנטנות'). מערך מורכב זה, הוא שמאפשר לצמח קליטה וניצול מיטביים של אנרגיית האור. אנו מכירים שני סוגים של מערכות אור: *PSI* הקולטת באופן אופטימלי גלים באורך 700 nm והאחרת, *PSII*, הקולטת גלים באורך 680 nm. קליטת האור, מאפשרת שחרור אלקטרונים, אשר מועברים במהירות בין חלבונים שונים (מכונים 'שרשרת העברת האלקטרונים') ומשמשים להפקת אנרגיה בצמח ולשמירתה, תוך פליטה של תוצר לוואי, חמצן, לאטמוספירה.

2. שלב שאינו תלוי באור (מעגל קלווין): בשלב זה, פחמן (C) שמקורו במולקולת הפחמן הדו חמצני ( $CO_2$ ), 'מקובע' ומשמש לבנייה של מולקולה המכילה שלושה פחמנים ( $C_3$ ). שתי מולקולות כאלה, מתחברות בהמשך זו לזו, ליצירת הפחמימה גלוקוזה ( $C_6$ ). פחמימות אשר נוצרו באופן ישיר מתהליך זה, משמשות בהמשך לסינתזה של חומרים אורגנים אחרים, כדוגמת: חומצות גרעין, חומצות שומן וחלבונים.



תמונה 2: סכמה המתארת את תהליך הפוטוסינתזה בצמחים. קליטת פחמן דו חמצני ואור מובילים ליצירת סוכר ופליטת חמצן לאטמוספירה.

בצמחים, מרבית תהליך הפוטוסינתזה מבוצע בעלים. בתוך העלה מצוי אברון המכונה 'כלורופלסט', בתוכו מצוי הכלורופיל. זוהי מולקולת פיגמנט הקולטת בעיקר את הצבעים הכחולים והאדומים של ספקטרום האור ופולטת חלק מהירוקים (לכן מרבית הצמחים, צבעם ירוק, אך נשוחח על כך בהמשך). פיגמנטים אחרים בצמח, בעיקר קרוטנואידים (אדום, כתום, צהוב), קולטים גם הם את אנרגיית האור, אך בעלים כמותם לרוב, נמוכה בהרבה מהכלורופיל.



תמונה 3: תהליך הפוטוסינתזה מתרחש בתוך הכלורופלסט

ניתן לחלק את תהליך הפוטוסינתזה לשני תהליכים נפרדים, האחד התלוי באור והאחר יכול להתקיים גם ללא אור:

1. שלב התלוי באור: עיקר האור, נקלט ע"י הכלורופלסט באזורים המכונים 'מערכות אור' ( $PS = Photosystem$ ). מערכות אלה, בנויות מקומפלקס של

### סוגי כלורופיל והשפעתם על גדילת הצמח

ציינו כי בלב ליבו של תהליך הפוטוסינתזה, מצויה מולקולת הכלורופיל. אותו צבען ירוק, המאפשר את קליטת האור וגדילת הצמח. למעשה, קיימים מספר סוגי כלורופיל, כאשר הנפוצים בעליי הצמח הם כלורופיל a וכלורופיל b והם האחראיים העיקריים לקליטת האור. שני סוגי הכלורופיל הללו נבדלים בשיאי בליעת האור בניהם בכ- 20 nm. בנוסף, כלורופיל b, בולע בעיקר אור אדום, בעוד כלורופיל a, בולע אור כחול וגם אדום. כאשר הם נמצאים בסמיכות זה לזה, הם מסוגלים, הלכה למעשה, לקלוט ספקטרום אור רחב בהרבה מזה הנקלט ע"י כל אחד מהם בנפרד. בפועל, המערכת הפוטוסינתית,



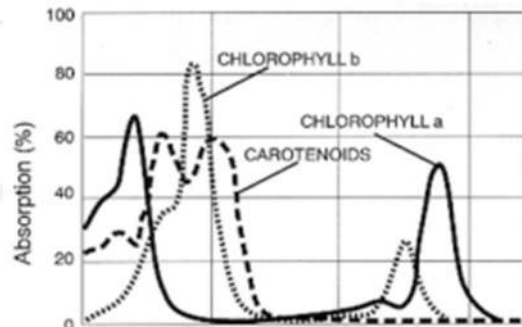
יחידת מידה זאת מתארת את כמות הקרינה הזמינה עבור תהליך הפוטוסינתזה, דהיינו החלק היחסי של הקרינה המצוי בתחום של 400 – 700 nm. הכוח האמיתי שבמדידת ערכי PAR, לעומת מדידות אחרות של עוצמות האור (למשל, LUX או וואט), הוא שמדידת PAR משקפת באופן ישיר את עוצמת האור שנקלט ע"י צמחים לצורך תהליך הפוטוסינתזה ואינה מתחשבת בעוצמת האור כפי שהיא נראית ע"י העיין האנושית (המוטה פעמים רבות ע"י אור ירוק, הנקלט בצמח רק בחלקו). חשוב לציין, כי ספקטרום האור, משפיע באופן שונה על צמחים, כתלות בסוג הצמח, תנאי הסביבה, שלב הגידול ועוד. ציינו לפני כן, כי הכלורופיל שתפקידו לקלוט את אנרגיית האור ולהמירה לאנרגיה כימית הדרושה לגדילת הצמח, קולט את מירב האור בתחומי האור הכחול והאדום ומשתמש בהם לפוטוסינתזה. לכן, נמצא כי ערכי ה PAR הגבוהים ביותר, מצויים בספקטרום הכחול והאדום ובאופן ספציפי יותר, גלים באורכי הנעים סביב ה- 660 nm (בצבע אדום), הם המובילים לערכי PAR הגבוהים ביותר. לצערנו, יצרנים רבים, אינם מדווחים על ערכי ה PAR של הנורות שלהם, כיוון שערך זה תלוי למשל בעומק האקווריום. ככל שהעומק עמוק יותר, ערך ה PAR, עבור אותה עוצמת תאורה, יפחת.

#### אורכי גל נוספים החשובים בגידול צמחיה

תחום האולטרה סגול (100-400 nm)

תחום הקרינה האולטרה סגולה (Ultra violet= UV), נמצא באורכי גל קצרים מדי לקליטה ע"י העין האנושית ולכן איננו מסוגלים להבחין בה. עם זאת, ידוע כי חשיפה ממושכת, או גבוהה לקרינה שכזאת, מסוכנת ליצורים רבים, בניהם האדם והצמחים. קרינת UV, אינה נמצאת בתחומי ה-PAR (אינה משמשת לפוטוסינתזה), כיוון שהיא עוצמתית מדי ולכן יוצרת נזקים לתאים. עם זאת היא מועילה בגידול צמחים, באופן עקיף. לרוב, מגדלי צמחיה תת מימית, משתמשים בקרינת ה-UV באופן המקרין ספציפית על המים בלבד ולא על הצמחים. מערכות המכונות 'סנני UV', מאפשרות

מסוגלת לבצע, במידת מה, התאמה לקליטת אור בספקטרום משתנה, בזכות שינוי ביחס כלורופיל a/b בכלורופלסט. כך למשל, כאשר צמח מוצל, הוא מסוגל לבצע התאמה לעוצמת התאורה הפוחתת ולשינוי בספקטרום המוצג לו ולהעלות באופן ניכר את כמות מערכות ה *PSII* (בה מצוי רב כלורופיל b), על חשבון מערכות ה *PSI*. שינויים אלה, המבוצעים בצל למשל, משפרים באופן ניכר את יעילות קליטת האור.



תמונה 4: ספקטרום הבליעה של chl a, chl b וקרוטנואידים. הצבענים השונים, במידה רבה משלימים זה את זה.

#### השפעת האור על גדילת הצמח

המורפולוגיה והפיזיולוגיה של צמחים, מושפעים באופן ניכר מספקטרום האור. ספקטרום ספציפי, הניתן בשלבים שונים של התפתחות הצמח, יכול להשפיע באופן שונה על הצימוח. אור כחול, למשל, הנקלט היטב ע"י כלורופיל a בעיקר, חיוני לצמחים להתפתחות הגבעול, צפיפות העלווה והתפתחות תקינה של שורשים החשובים כל כך, במיוחד בשלבי ההתפתחות הראשוניים. בנוסף, הוא מעודד פתיחת פיוניות ותוך כך, קליטה אפקטיבית של CO<sub>2</sub>. אור אדום, ידוע כמעודד צמיחת גבעול, גדילת עלים ופריחה (בגידולים הידרופונים), בשלבים התפתחותיים מאוחרים יותר של הצמח (בצמח הבוגר). עם זאת, חשוב לזכור כי רק שילוב מאוזן של אורכי גל יוביל לצמיחה תקינה של צמחים.

#### הספקטרום האלקטרומגנטי הדרוש לגדילת צמחים

על מנת לקבוע מהם אורכי הגל האופטימליים עבור גידול צמחים, נקבעה מידה המכונה PAR (Photosynthesis Active Radiation).

\* קליטת האור הירוק, נעשית בחלקה ע"י פיגמנטים המכונים קסנטופילים.



תמונה 5: אקווריום צמחיה סבך מאוד. יש משמעות גדולה לאלמנטים ירוקים בספקטרום, אשר מסוגלים לחדור דרך הסבך.

#### תחום האדום הרחוק (700-850nm)

פוטון באורכי גל אדומים רחוקים (Far/ Infra- red), אינם נושאים מספיק אנרגיה לצורך שפעול המערכת הפוטוסינתטית, אך הם מהווים עבור הצמח סיגנל חשוב. לצמחים ישנה האפשרות לזהות את מיקומם ביחס לקרינת השמש ע"י 'פיענוח' היחסים בין קרינה אדומה לקרינה אדומה רחוקה. קרינה באזור ה-  $660\text{ nm}$  מציינת קרינת שמש חזקה. קרינה באורך של  $730-850\text{ nm}$  מציינת מצב של קרינה בצל (עבור הצמח השלם) או מיקום נמוך בגבעול (במקרה של עלה בודד בצמח שלם). עם קבלת המידע, יכול הצמח להגיב במספר אופנים, בניהם הארכת הגבעול, על מנת לשפר את כמות קליטת הקרינה. נציין כי חדירות האור האדום הרחוק במים היא נמוכה ולכן חשיבותו באקווריום בכלל ובאקווריומים גבוהים במיוחד, היא פחותה.

#### סוגי התאורה הקיימים כיום

כיום קיימים מספר סוגי תאורה זמינים בגידולי צמחים באקווריום ובמערכות הידרופוניות. המקובלת בניהם היא מערכת ה- LED (Light-Emitting Diode). מערכת זו, השאירה מאחור מערכות ותיקות ומוכרות כמו: תאורת הפלואורוסנט (T5 ו-T8), המטאהלייט, נורות ה- HPS (נורת לחץ גבוה) ונורות הליכון. ניתן

הקרנה ממוקדת במערכת סגורה, ישירות על מי האקווריום העוברים דרכה, באופן יעיל ובטוח, ללא חשיפת הקרינה ליצורים החיים במים. מערכת ה- UV, מסייעת בעיכוב של גורמי מחלה רבים באקווריום, כמו גם בעיכוב התפשטות אצות המתחרות בצמחים על משאבים זהים (אור וזמינות חומר אורגני, בעיקר). קרינה ישירה של UV במערכות הידרופוניות, מעצימה את הצבעים הכהים (סגולים- כחולים) של העלווה והגבעולים בחלק מהצמחים. נזכיר, כי קרינה ישירה שכזאת, שלא דרך מערכות הסתרה, מסוכנת למגוון בעלי חיים וגם לנו כבני אדם.

#### אור ירוק (500-600 nm)

מקובל לחשוב, כי אור ירוק, אינו תורם לתהליך הפוטוסינתזה. ההוכחה כביכול של טענה זאת היא שצבע מרבית הצמחים הוא ירוק, כתוצאה מחוסר האפשרות של הצמח לקלוט אור זה ובפועל להחזירו לעין הצופה. נכון הוא שקליטה של הצבע הירוק היא מופחתת מאלה האדומים והכחולים, אך בפועל  $50-90\%$  מהקרינה הירוקה נקלטת על ידי צמחים ורק חלק ממנה מוחזר מהם\*. לאור הירוק יכולת חדירות גבוהה יותר מהקרינה האדומה והכחולה, במספר רמות: חדירות גבוהה ברמת אוכלוסיית הצמחים - אפשרות של צמח נמוך לקבל אור למרות שהוא גדל בחסותו של צמח המסוכך עליו; ברמת הצמח עצמו - עלים נמוכים יותר בגבעול, מסוגלים לקבלת קרינה ירוקה למרות שמעליהם צומחת חופת עלים; ברמת העלה עצמו - חדירות גבוהה דרך שכבת המזופיל לתוך העלה עצמו וקליטת קרינה בשכבות העלה הפנימיות; חדירות בעמודת המים - האור הירוק אנרגטי יותר מהאור האדום ולכן חדירותו, דרך המים, טובה יותר. כך למעשה אור ירוק וחדירותו הרבה, מהווים יתרון בקליטת אור באזורים בהם אורכי גל אחרים, כלל אינם חודרים. בנוסף, ידוע כי לקרינה הירוקה, חשיבות גדולה במגוון תגובות פיזיולוגיות והתאמה של הצמח לסביבה, בניהם: שליטה בפיוניות העלה, צמיחת העלווה וכיסויה, העברת אותות (signaling) באזור העלים, התאמה סביבתית ותגובה פיזיולוגית כללית לאותות.



לתהליך הפוטוסינתזה. הקרינה המגוונת של השמש, מרמזת לנו כי הארה ספציפית של הצמח בתאורה כחולה ואדומה בלבד, אינה מומלצת וישנו יתרון ברור לתאורות המאפשרות ספקטרום רחב (Full spectrum). ספקטרום רחב, אידאלי, יכלול את התחום הנראה כולו (380 – 740 nm) לצד הארה מסויימת בתחום האולטרה סגול והאינפרא אדום. שינויים של התפלגות התאורה, במשך שעות ההארה, מאפשרים גם הם כיוונון נוסף של אופי ההארה והפיכתו לאופטימלי עבור הצמחים, בהתאם לסוג הצמחים, השלב ההתפתחותי וקצב הגדילה המבוקש.

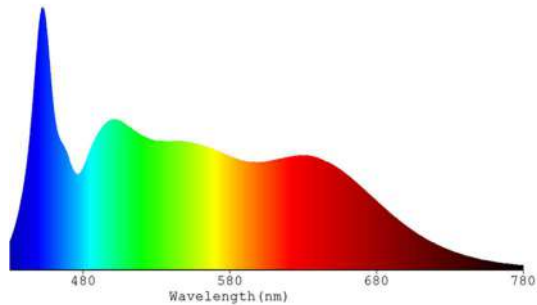
### מורכבות הגידול הרב זני (פוליקולטוראלי)

בניגוד לגידולים חקלאיים המשמשים ליבול, אקווריומי צמחיה ופלודריומים, הם מערכות בהן מגדלים מגוון רחב של צמחים (רב זן- או פוליקולטורה). אם בגידולים מונוקולטורים, נוכל למצוא בספרות את תנאי ההארה האופטימליים, במקרה שלנו, המצב מורכב בהרבה, בין היתר, כיוון שכל צמח רגיש לספקטרום, משך ועוצמת הארה שונים. בנוסף, תנאי ההארה האופטימליים, תלויים גם בתנאי הסביבה ובשלב ההתפתחותי של הצמח. בשל כך, נפתחת מטריצה כמעט אינסופית של אפשרויות הארה. לכן, נראה כי לא נוכל למצוא תנאים ספציפיים לגידולים שכאלה, אלא, נאלץ לבצע מיצוע של התכונות. בנוסף, נעדיף לאכלס את מערכת הגידול שלנו בצמחים הרגישים במידה דומה לאור. זוהי סיבה נוספת, לחשיבות העצומה שבשימוש בתאורת ה Full spectrum באקווריומי צמחיה, פלודריומים ומערכות הידרופוניות פוליקולטוראליות.



תמונה 7: אקווריום הצמחיה מכיל מגוון רחב של סוגי צמחים ולכן מאתגר יותר.

להשתמש בתאורה מלאכותי אלה כנוספות לאור השמש, עבור אקווריומים ומערכות הידרופוניות המצויות בחממות/ פרגולות וכו' (Outdoor), כמו גם כמקור אור יחיד, עבור מערכות גידול המצויות בתוך הבית (indoor). בעבר, נורות ה LED היוו יתרון רק בהיבט של עלות המערכת ועלות ההפעלה הנמוכה. כיום, עם התקדמות הטכנולוגיה, היתרונות של נורות ה LED אפילו מתגברים. בראשם נמצאת השליטה המלאה בעוצמת התאורה, זוויות ההארה ובחירת ספקטרום ספציפי או ספקטרום רחב במיוחד (full spectrum), בהתאם לצורך של המגדל. כל אלה באים לצד פליטת חום נמוכה, תחזוקה פשוטה וזמן חיים ארוך. מערכות ה LED מתקדמות, מאפשרות גם שינוי של התאורה במהלך שעות ההארה, כך שלמעשה מצב זה יכול לחקות את קרינת השמש המשתנה במהלך היום.



תמונה 6: דוגמה לתאורת לד בספקטרום רחב המתאימה לגידול צמחיה.

### מהם תנאי ההארה האידאליים?

ציינו כי תחום ההארה שבין 400 ל- 700 nm, הוא המשפיע ביותר על גדילת הצמח ובאופן ספציפי התחום הצר של הקרינה הכחולה והאדומה. עם זאת, הראנו גם את ההשפעה העקיפה של קרינה בגלים קצרים יותר (אולטרה סגולה UV=ultra violet) וארוכים יותר, המצויים בתחום האדום (הרחוק IR= Infra-red), על גדילת הצמח. הגיוני לחשוב, כי אור שמש, או מערכות המחקות את התפלגות התאורה באופן הדומה לקרינת השמש, הם האופטימליים עבור גידול צמחים, שכן צמחים עברו התאמה ארוכת שנים לאור זה. באופן כללי, השמש מקרינה דווקא אחוז גבוה של קרינה בתחום 500 – 600 nm (אור ירוק, צהוב וכתום) ולא באור אדום, התורם ביותר



## מקורות מידע

- Nelson, Jacob & Bugbee, Bruce. (2014). *Economic Analysis of Greenhouse Lighting: Light Emitting Diodes vs. High Intensity Discharge Fixtures*. PloS one. 9. e99010. 10.1371/journal.pone.0099010.
- Darko, E., Heydarizadeh, P., Schoefs, B., & Sabzalian, M. R. (2014). *Photosynthesis under artificial light: the shift in primary and secondary metabolism*. Philosophical transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological sciences, 369(1640), 20130243.
- Hayley L. Smith, Lorna McAusland, Erik H. Murchie . (2017). *Don't ignore the green light: exploring diverse roles in plant processes*, Journal of Experimental Botany, Volume 68, Issue 9, 1 April 2017, Pages 2099–2110,
- Naznin, M.T., Lefsrud, M., Gravel, V. and Azad, M.O.K. (2019). "Blue Light added with Red LEDs Enhance Growth Characteristics, Pigments Content, and Antioxidant Capacity in Lettuce, Spinach, Kale, Basil, and Sweet Pepper in a Controlled Environment." Plants(Basel), 8(4).
- Magagnini G, Grassi G, Kotiranta S. (2018), *The Effect of Light Spectrum on the Morphology and Cannabinoid Content of Cannabis sativa L*, Med Cannabis Cannabinoids, 1:19-27
- Kalaitzoglou, P., van Ieperen, W., Harbinson, J., van der Meer, M., Martinakos, S., Weerheim, K., Nicole, C., & Marcelis, L. (2019). *Effects of Continuous or End-of-Day Far-Red Light on Tomato Plant Growth, Morphology, Light Absorption, and Fruit Production*. Frontiers in plant science, 10, 322. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.00322>