



צבעים מבניים בטבע

יעל פלדמן-מגור, דוקטורנית, המחלקה להוראת המדעים, מכון ויצמן למדע,
המחלקה למדעי הטבע והחיים האוניברסיטה הפתוחה

ז'אנה אוסיפוב, מורה לכימיה, בית ספר מקיף ד' ע"ש רבין, אשקלון

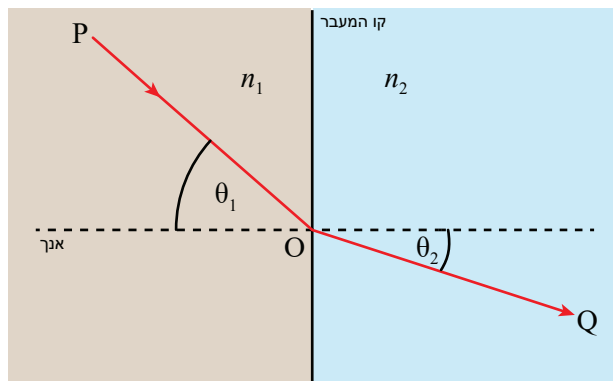
אור

אור בתחום הנראה הוא כינוי כולל לקרינה אלקטרומגנטית, אשר אורך הגל שלה נע בין 400 ל-750 ננומטר. קרינה אלקטרומגנטית קיימת גם באורכי גל אחרים שאיננו יכולים לראות. כבר בתקופתו של אייזיק ניוטון היה ידוע כי האור ניתן לתיאור מצד אחד באמצעות אופטיקה לינארית, בדומה לקרן של חלקיקים, ומצד שני נצפו תופעות גליות כגון התאבכות ועקיפה באור וזוהי למעשה הדואליות של גליות האור. כאשר שני גלים מגיעים לנקודת שיא יחד יש גובה כפול – התאבכות בונה; וכאשר גל אחד מגיע לשיא והאחר לשפל – יש התאבכות הורסת (ראו תמונה 2). כאשר התאבכות בונה נופלת בסקלת האור הנראה, אנו נראה אור. מנות האור מיוצגות על ידי פוטונים. כאשר פוטונים של אור פוגעים

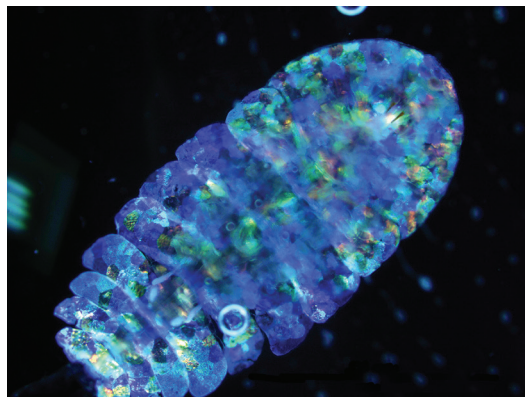
ספירי ים (Sapphirinidae) הם יצורים ימיים באורך של מספר מ"מ המציגים גוונים כחולים זוהרים וברגע הם יכולים להפוך לבלתי-נראים, ראו סרטון: [ספיר הים](#)

בכתבה זו נדון ביצורים אלו (ראו תמונה 1) שצבעם משתנה בהתאם לזווית האור באמצעות מבנים ננומטריים של גבישי גואנין. דוגמה זו היא דוגמה לצבע הנקרא צבע מבני. מנגנון יצירת צבע מבני שונה מהמנגנון המוכר לנו מחיי היום יום. כדי להבין את מנגנון הצבע המבני נחזור תחילה על מושגים הקשורים באור וצבע. לאחר מכן נסביר מה הם צבעים מבניים ונציג מחקר שבוצע על ספיר הים במסגרת עבודת הדוקטורט של ד"ר דביר גור מקבוצת המחקר של פרופ' ליאה אדדי ופרופ' סטיב ווינר.¹

1 המאמר מבוסס על עבודה בקורס "מבוא לחומרים וננוטכנולוגיה" המועבר במחלקה להוראת המדעים במכון ויצמן בהנחיית פרופ' רון בלונדר, ועוסק במחקר מעבודת הדוקטורט של ד"ר דביר גור מקבוצת המחקר של פרופ' ליאה אדדי ופרופ' סטיב ווינר מהמחלקה הביולוגיה מבנית במכון ויצמן למדע.



תמונה 3: חוק סנל



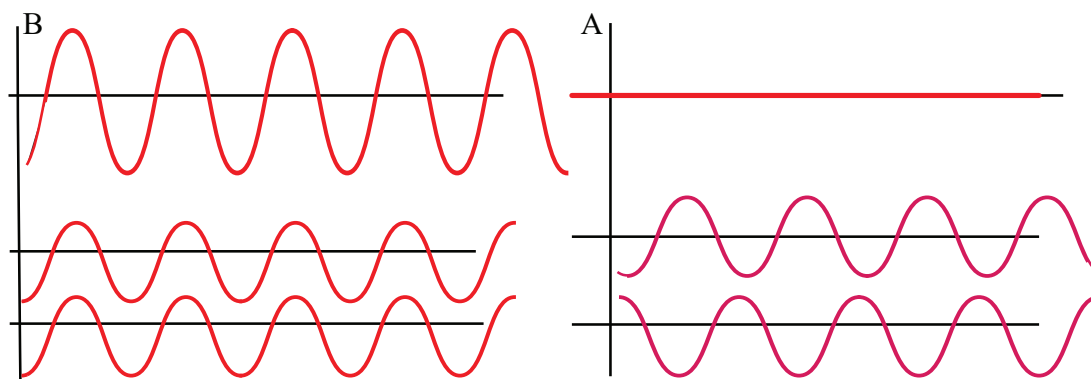
תמונה 1: ספיר הים
התמונה באדיבות ד"ר דביר גור ופרופ' ליאה אדדי.

הנראה ומפזרים ומחזירים לעינינו אורכי גל שאינם בולעים, ואלו הצבעים שאנו רואים. בתעשייה פיגמנטים משמשים לצביעת חומרים שונים כגון: דיו, פלסטיק, טקסטיל ואפילו מזון. בביוכימיה פיגמנט הוא כל תרכובת צבעונית המצויה בתאיהם של יצורים חיים. הפיגמנטים הם כרומופורים, חלק ממולקולה, או קבוצה פונקציונלית בה, המעניקים למולקולה צבע. ניתן לחלק את מרבית הכרומופורים לשני סוגים: מערכות מצומדות וקומפלקסים מתכתיים. בראשון, רמות האנרגיה שביניהן עוברים האלקטרונים הם אורביטלי π מורחבים, הנוצרים על ידי סדרת קשרים יחידים וכפולים, לסירוגין, לעתים במערכות ארומטיות. לדוגמה, ליקופן, בטא-קרופן ואנתוציאנין. דוגמאות לכרומופורים מסוג זה הן כלורופיל (המשתמש בצמחים לפוטוסינתזה), המוגלובין (המעניק לכדוריות דם אדומות את צבען). בשני, קומפלקסי מתכת פועלים ככרומופורים על ידי פיצול אורביטלי d , לדוגמה, תמיסת יוני נחושת. בטבע קיימים צבעים נוספים שאינם מבוססים על בליעה אלא על ידי השתקפות והחזרה של אור, ואילו הם צבעים מבניים.

בחומר הקרן נשברת, חלק מהאור נבלע וחלקו מוחזר, ואנו בעצם רואים את הצבע של האור המוחזר. וילברורד סנל מצא כבר בשנת 1621 קשר כללי בין זווית הפגיעה לזווית השבירה. הוא גילה כי קיים יחס סינוס זווית השבירה לסינוס זווית הפגיעה. יחס זה תלוי בחומר, משתנה מחומר לחומר ונקרא מקדם השבירה של החומר ביחס לאוויר או לריק (ראו תמונה 3). אחת ההגדרות של מקדם השבירה היא היחס בין מהירות האור בריק (מסומנת באות c) למהירות האור בחומר (מסומנת באות v) חישוב מקדם השבירה הוא באמצעות הנוסחה $n=c/v$. בהתאם להגדרה זו מקדם השבירה תמיד גדול או שווה 1, שכן לא ניתן לעבור את מהירות האור.

צבעים

בטבע קיימים מספר מקורות לצבעים: פיגמנטים (צבענים), שינוי צבע עקב פליטת אור (כתוצאה מתגובה כימית) וצבעים מבניים. הצבעים המוכרים לנו ביותר מחיי היום יום הם צבעים מבוססי פיגמנטים. הכוונה לחומרים המשנים את צבע האור המשתקף מהם כתוצאה מהחזרה ובליעה סלקטיבית של אורך הגל. פיגמנטים בולעים חלק מאורכי הגל בתחום



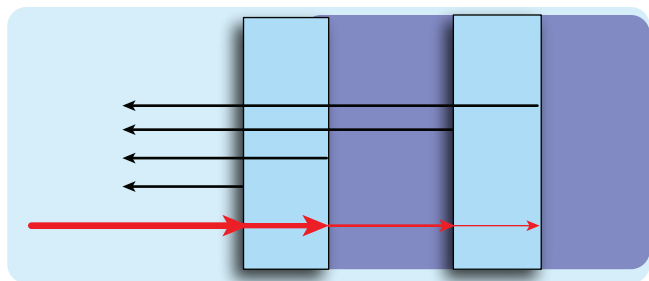
תמונה 2: התאבכות בונה והתאבכות הורסת. A - התאבכות הורסת B - התאבכות בונה

צבעים מבניים

צבעים מבניים מיוצרים על ידי אורגניזם באמצעות מבנים שכבתיים אשר להם אורכי גל שונים. מדובר בשכבות של חומרים דיאלקטריים (חומרים שקופים), ולכל שכבה מקדם שבירה שונה (ראו תמונה 4).

בהתייחסות לתמונה מסוג זה הסבירה פרופ' אדדי כי "צבעים מבניים נוצרים על ידי שכבות של שני חומרים שמסודרות בצורה מאוד-מאוד שווה, ויש להם מקדם שבירה או מקדם החזרה שונה אחד מהשני. האור פוגע במערך של שכבות, חלקו מוחזר וחלקו עובר הלאה, ואז עובר השתקפות מהשכבה הבאה, חלקו עובר הלאה, עובר השתקפות מהשכבה הבאה. מה שיוצא החוצה זה אור שעובר התאבכות בונה. במידה והגלים היו הפוכים הם היו מנטרלים אחד את השני, אבל בגלל שהם הולכים ביחד אז הם עוברים הגברה כתלות באורך גל. אם העובי של השכבות מסודר כך שהאור שעובר הגברה בסדר גודל של אור נראה, אז אנחנו יכולים לראות אותו" (אדדי, מסע הקסם המדעי, 2016).

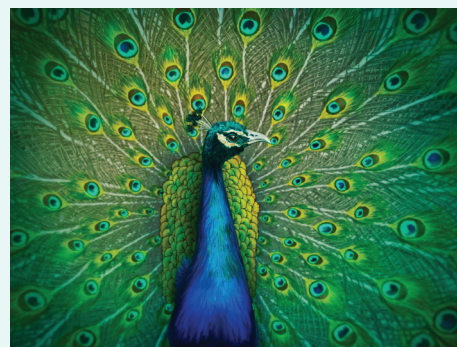
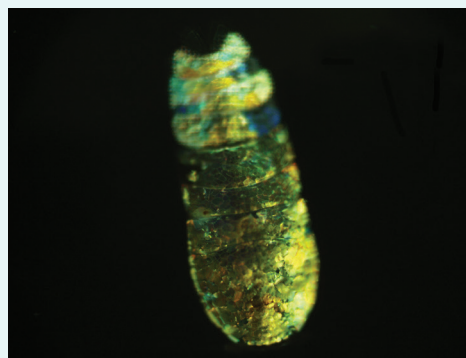
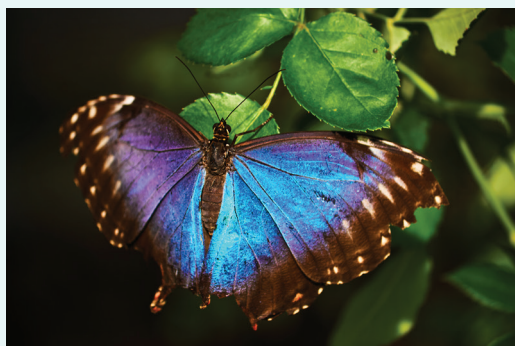
כאשר מתייחסים לצבעים מבניים, יש להתייחס לפרמטרים הבאים: מספר השכבות (N), מקדם השבירה (n), זווית ההחזרה (θ), עובי השכבה (d), אורך הגל (λ) והעובי האופטי שהוא מכפלת עובי השכבה במקדם השבירה (nd). הסידור היעיל ביותר של השכבות הוא כאשר העובי האופטי



תמונה 4: החזרת אור היוצרת צבעים מבניים

של שתי השכבות שווה לרבע מאורך הגל של האור המוחזר המתקבל (Denton & Land, 1971). כאשר מכפלת העובי האופטי במקדם השבירה נופלת בטווח האור הנראה, ניתן להבחין בצבעים שונים.

קיימים אורגניזמים שונים המפיקים צבעים מבניים, לדוגמה, הזוהר הנראה מקשקשי הדגים, צבע העכביש הכסוף, כנפי פרפרים וצבעי הטווס ובמהלך האבולוציה התפתחו מנגנונים שונים להפקת הצבעים בכל אורגניזם (ראו תמונה 5). המנגנון האבולוציוני-אופטי שאליו נתייחס בעבודה זו נקרא Multilayer Reflector כלומר, מנגנון החזרה רב-שכבתי. מנגנון זה מצוי בספיר הים.



תמונה 5: צבעים מבניים בטבע: ספיר (תמונה באדיבות פרופ' ליאה אדדי וד"ר דביר גור), פרפר, טווס, דג כסוף ותוכי כחול-צהוב מסוג Araararuna

ספיר הים

ספיר הים הוא יצור זעיר, וגודלו נע בין 1-7 מ"מ. קיימים מספר מינים של ספירי ים, וכולם שייכים למשפחת הסרטנים. חלק מספירי הים משנים את צבעם כתגובה לאור, ובמהלך העבודה נציג מנגנון אופטי זה. החלפת הצבעים מכוונת למטרת תקשורת. למשל, ספירי ים מסוג *Copilia mirabilis* הופך שקוף ואז מוגן מפני טורפים, וכשהוא בעל צבע, נקבות יכולות לראות אותו. ספירי הים הזכר חסר עיניים, לנקבה יש עיניים, והיא לא מחליפה צבעים. היא תמיד שקופה כדי שתוכל להתרבות בצורה מוגנת. כשספירי הים שוחה, ניתן לראות צבעים מרהיבים בגוון של כחול-סגול ולפעמים גם צהוב ואדום (Gur et al, 2015).

גואנין

הגואנין הוא בסיס חנקני (ראו תמונה 6), נגזרת של פורין ואחד ממרכיבי ה-DNA וה-RNA. הגואנין התגלה לראשונה בשנת 1846 בצואה, בשנת 1861 זוהה בזוהר של קשקשי דגים (Gur et al, 2017). לגואנין בצורת הגביש הנומטרית, יש תכונות אופטיות. תכונות אלו מושפעות משלושה מרכיבים: צורת הגביש, גודלו וסידורו. הגביש הפוטוני מורכב מהרבה גבישים של גואנין המאורגנים בשכבות עם שכבות ציטופלסמה ביניהן (מבנה רב שכבתי - multilayer crystal) בגביש פוטוני הכוונה לננו-מבנה הבנוי בצורה מחזורית מחומרים דיאלקטריים. מבנה הגביש מתוכנן בצורה המשפיעה על התקדמות האור בתוכו, כלומר, על

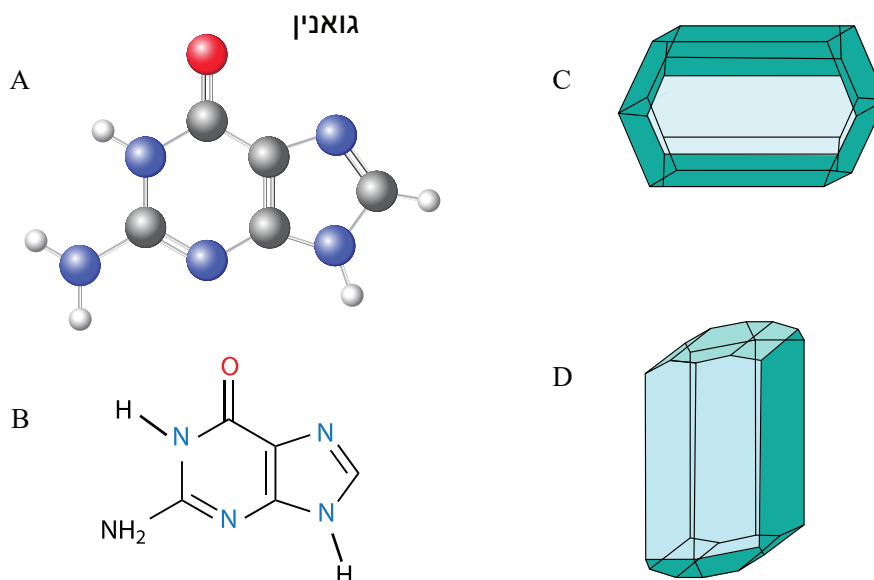
מעבר פוטונים דרכו. מבנים פוטונים אלו מורכבים משכבות של חומרים שקופים עם מקדמי שבירה שונים, כך שהאור המשתקף עובר התאבכות בונה עבור אורכי גל מסוימים והתאבכות הורסת עבור אורכי גל אחרים. מה שמייחד את הגואנין לעומת חומרים אורגניים או בסיסים חנקניים אחרים הוא מקדם השבירה הגבוה בכיוון מסוים, 1.83 שנחשב גבוה ביחס לחומרים ברקמות ביולוגיות (Gur et al, 2017).

תיאור המחקר

בחלק זה נתאר את המחקר שבוצע בקבוצת המחקר של פרופ' ליאה אדדי ופרופ' סטיב ווירנר כעבודת הדוקטורט של ד"ר דביר גור. (Gur et al., 2015)

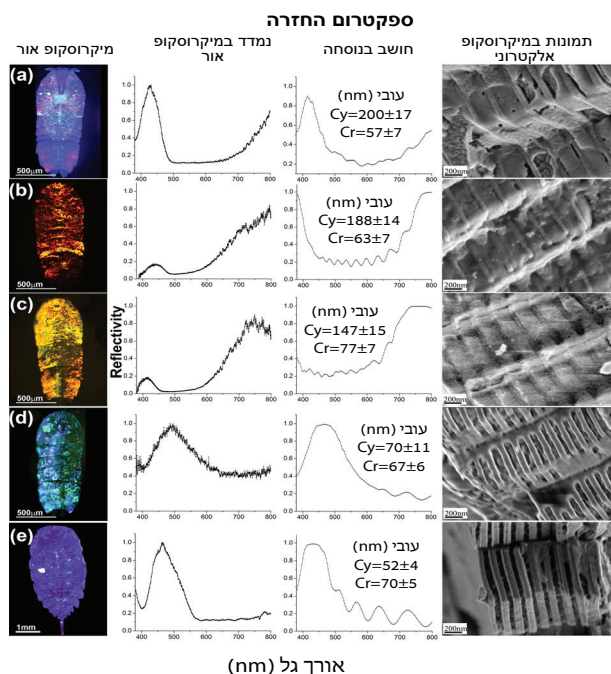
המחקר בוצע במחלקה לביולוגיה מבנית בפקולטה לכימיה, ומוצגות בו תופעות פיזיקליות, כימיות וביולוגיות. לאור ייחודיות המחקר כמשלב שלושה תחומי מדע, היו שותפים לו חוקרים ממחלקות שונות במכון ויצמן. בספירי הים שהוצגו ניתן לראות דוגמה למבנים פוטוניים המייצרים מגוון צבעים מבניים שונים כאשר האור בזווית מסוימת לגב שלהם. החוקרים אספו מהים האדום באילת שני סוגים של ספירי ים בצבעים שונים: *Sapphirina metallina*; *Copilia mirabilis*.

מטרות המחקר: מטרת המחקר היו להבין את הבסיס המבני, שונות הצבעים והתלות הזוויתית החזקה של האור המשתקף מספירי הים ולהבין את מנגנון שינוי הצבע בספירי הים.



תמונה 6: א-ב B - מצגים מבנה מולקולקת גואנין. C-D מצגים מורפולוגיה תאורטית של הגביש.

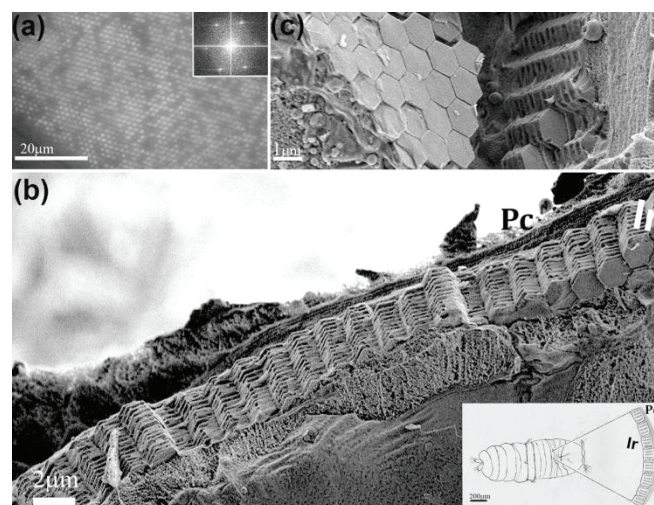
אלו מפיק צבעים מבניים. הפקת צבעים מבניים משכבות אלו מתאפשרת מאחר שמקדם השבירה של גבישי הגואנין 1.83 מהווה ניגוד למקדם השבירה של הציטופלסמה 1.33. עובי שכבות גבישי הגואנין והציטופלסמה נמדד ב- cryo-SEM, ועל בסיס מדידות אלו חושב ספקטרום ההחזרה הצפוי (expected reflectance spectra) ונמצא כי הוא דומה למדידות ההחזרה שחושבו באמצעות מיקרוסקופ אור. נמצא כי בספירי ים בצבעים שונים ישנו הבדל בעובי הציטופלסמה (ראו תמונה 8).



תמונה 8: החזרת אור ומבנה ספירי הים (Gur et al, 2015)
תמונה 8 מחולקת לארבע עמודות. בעמודה השלישית של מיקרוסקופ אור ניתן לראות צבעים שונים של ספירי ים. ספירי ים בתמונות a-d הם מסוג *Sapphirina metallina*, ובתמונה e ספירי הים הוא מסוג *Copilia mirabilis*. שתי העמודות (2-3) האמצעיות מייצגות את ספקטרום ההחזרה. עמודה 2 מייצגת ספקטרום החזרה שנמדד במיקרוסקופ אופטי, ועמודה 3 את ספקטרום ההחזרה שחושב באמצעות נוסחה לאחר חישוב עובי שכבות הציטופלסמה וגבישי הגואנין שנמדד באמצעות מיקרוסקופ האלקטרונים. הגרפים של שתי העמודות נראים דומים כאשר משווים ביניהם (שוני בחלק ההתחלתי של ציר ה-y בעמודה 2 נובע מרגישות ה-גלאי במיקרוסקופ האופטי). ניתן לראות בתמונה כי עובי גבישי הגואנין כמעט אינו משתנה לעומת עובי הציטופלסמה שמשתנה עובי (cy = עובי הציטופלסמה, cr = עובי גבישי הגואנין). בעמודה 4 ניתן לראות את השינוי בעובי שכבת הציטופלסמה כפי שנצפה ב- cryo-SEM.

Reprinted with permission from Journal of the American Chemical Society. Copyright (2015) American Chemical Society

כלי המחקר: מיקרוסקופ אופטי ייעודי שנבנה למטרת המחקר, ובאמצעותו ניתן למדוד את ספקטרום החזרת האור, cryo-SEM - מיקרוסקופ אלקטרוני לדגימות ביולוגיות, כדי לצפות בהן יש לקרר את הדגימות לטמפר' נמוכות (מתחת ל-100 מעלות צלזיוס). ניתן להסתכל על מבנה השכבות שמהן מופקים צבעים מבניים במיקרוסקופ אופטי, עם זאת, על מנת לרדת לרזולוציות ננומטריות ולהבין את מבנה המנגנון שלפיו מופק הצבע המבני, יש להשתמש במיקרוסקופ אלקטרוני סורק (SEM) (ראו תמונה 7).



תמונה 7: גבישי גואנין במיקרוסקופים שונים.

התמונה לקוחה מתוך מחקרם של גור ועמיתיו (Gur et al, 2015). בתמונה a ניתן לצפות בגבישי גואנין בצורת משושים קטנים שהודגמו במיקרוסקופ אור, ובתמונות b ו- c ניתן לצפות בגבישים במבנה משושי כפי שהודגמו במיקרוסקופ אלקטרוני שבו הוקפאה דגימה (cryo-SEM).

Reprinted with permission from Journal of the American Chemical Society. Copyright (2015) American Chemical Society

מהלך המחקר ותוצאות המחקר: בחלק זה נתאר שלוש תופעות הנצפות בספירי הים: שונות הצבעים והבסיס המבני, שינוי צבע בהתאם לכיוון הזוויתי (angular orientation) ביחס לאור ושינוי צבע בתנאי אור וחושך.

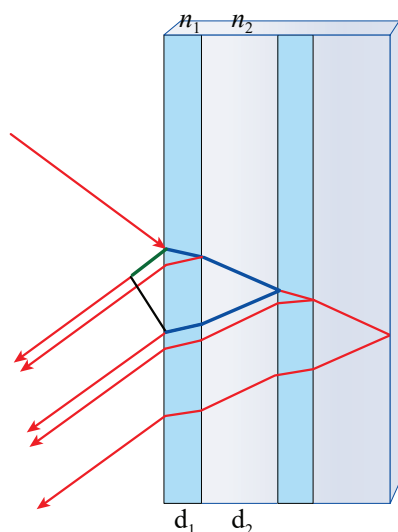
א. שונות הצבעים והבסיס המבני:

החוקרים אספו ספירי ים בצבעים שונים. בשלב הראשון של המחקר כדי להבין את שונות הצבעים של ספירי הים, צפו בהם באמצעות המיקרוסקופ האופטי הייעודי שנבנה למחקר. ולאחר מכן על מנת להבין את הבסיס המבני נעשה שימוש במיקרוסקופ אלקטרוני מסוג, cryo-SEM כך שספירי הים הוקפאו תחילה בלחץ גבוה ולאחר מכן נצפו במיקרוסקופ האלקטרוני. גב ספירי הים ממין זכר בנוי משכבות של גבישי גואנין בצורת משושה וציטופלסמה, ושילוב שכבות

ים וצפו בהם באור, ולאחר מכן החליפו בין הקבוצות. בחלק זה של המחקר צפו בהחלפת הצבעים של ספירי הים והדגימו כי התהליך הפיך והדרגתי. במחקר השתמשו במיקרוסקופ אופטי כדי לעקוב אחרי השינוי בצבע. ספירי הים נשמרו בחושך בזמן הלילה, ולאחר מכן צפו בהם במיקרוסקופ אור. החוקרים השתמשו באור בעוצמה שונה וראו כי באור בעוצמה נמוכה שינוי הצבע איטי ויכול להימשך עד תשע שעות ואילו בעוצמה גבוהה השינוי מהיר ויכול להימשך 3 דקות. בחלק זה של המחקר מצאו כי שכבות הציטופלסמה מתכווצות באור ומתרחבות בחושך ותופעה זו מסבירה את השינוי בצבע.

מבט על התעשייה

הטכנולוגיה המתבססת על הפקת צבעים מבניים עוד נמצאת בשלב מחקרי באוניברסיטאות מחקר (Yuan, Zhou, Shi & Zhang, 2015; Diao, Liu, Toh, Shi & Zi, 2013). מבחינת מנגנון ההחזרה הרב-שכבתית בתעשייה ניתן למצוא דוגמה למנגנון ההחזרה הרב-שכבתית בפיתוח מראות דיאלקטריות. חומרים דיאלקטריים משמשים להכנת מראות דיאלקטריות, המכונות גם מראות בראג. זוהי למעשה מראה המורכבת מהרבה שכבות דקות של חומרים דיאלקטריים. אפשר לייצר מראות בעלות רפלקטיביות גבוהה כאשר 99.999% מהאור הפוגע במראה מוחזר. מראות דיאלקטריות פשוטות מתפקדות כמו גבישים פוטוניים חד-ממדיים, המורכבים משכבות עם מקדם שבירה גבוה, המשולבים בשכבות עם מקדם שבירה נמוך (ראו תמונה 10).

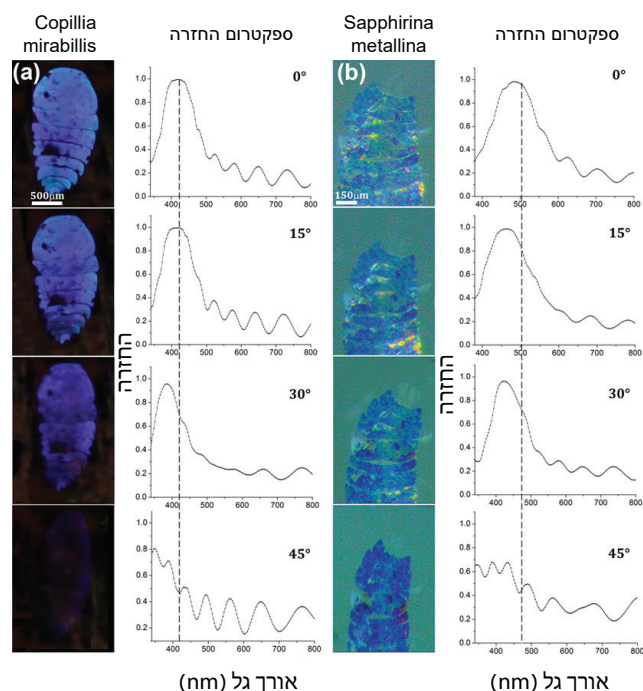


תמונה 10: תרשים של מראה דיאלקטרי.

ניתן לראות תרשים של מראה דיאלקטרי משכבות דקות עם מקדם שבירה גבוה n_1 המשולבות עם שכבות עבות בעלות מקדם שבירה נמוך n_2 . אורכי הנתיב B ו-A נבדלים במספר אורכי גל שלמים, מה שגורם להתאבכות בונה וראיית צבע.

ב. שינוי צבע בהתאם לכיוון הזוויתי (angular orientation) ביחס לאור:

אחת התופעות המיוחדות של ספירי הים מסוג *Copilia mirabilis* הינה העלמות פתאומית במהלך שחייה (<http://www.liquidguru.com/octopod-copepod>). במחקר מדדו את ספקטרום ההחזרה של ספירי ים מסוג *Copilia mirabilis* ו-*Sapphirina metallina* וראו שינוי צבע בהתאם לכיוון הזוויתי (angular orientation) ביחס לאור (ראו תמונה 9).



תמונה 9: הכיוון הזוויתי ביחס לאור (Gur et al, 2015)

בעמודה 1 ניתן לראות את ספירי הים מסוג *Copilia mirabilis*, ובגרפים הצמודים לעמודה נראה שינוי הספקטרום בהתאם לזווית כך שרק בזווית 45 מעלות לאור הם הופכים שקופים. כאשר ספירי ים זכריים מסוג *Copilia mirabilis* מסובכים את גבם אל האור בזווית של 45 מעלות בעודם מבצעים תמרון שחייה ספירלי - אורך הגל של האור המוחזר מוסח אל מחוץ לטווח אורכי הגל של האור הנראה לעין ועובר אל טווח אורכי הגל של קרינה על-סגולה שאינה נראית. לעומת זאת, אור הפוגע בזווית ישרה, מחזיר את הצבע הכחול היפה. בעמודה 3 ספירי הים הוא מסוג *Sapphirina metallina*, וניתן לראות שינויים בגוון המג'נטה בחלק מהתמונות. הגרפים הצמודים מימין, עמודה 4 מתארים את שינוי הספקטרום ביחס לזווית.

Reprinted with permission from Journal of the American Chemical Society. Copyright (2015) American Chemical Society

ג. שינוי צבע בתנאי אור וחושך

החוקרים המשיכו לחקור ופרסמו מחקר המשך (Gur et al, 2016) תוך כדי שימוש באותם כלי מחקר. במחקר ההמשך אספו החוקרים 25 ספירי ים וצפו בהם בחושך ו 25 ספירי

Diao, Y. Y., Liu, X. Y., Toh, G. W., Shi, L., & Zi, J. (2013). Multiple structural coloring of silk&fibroin photonic crystals and humidity&responsive color sensing. *Advanced Functional Materials*, 23(43), 5373-5380.

Gur, D., Leshem, B., Pierantoni, M., Farstey, V., Oron, D., Weiner, S., & Addadi, L. (2015). Structural basis for the brilliant colors of the sapphirinid copepods. *Journal of the American Chemical Society*, 137(26), 8408-8411.

Gur, D., Leshem, B., Farstey, V., Oron, D., Addadi, L., & Weiner, S. (2016). Light&Induced Color Change in the Sapphirinid Copepods: Tunable Photonic Crystals. *Advanced Functional Materials*, 26(9), 1393-1399.

Gur, D., Palmer, B. A., Weiner, S., & Addadi, L. (2017). Light Manipulation by Guanine Crystals in Organisms: Biogenic Scatterers, Mirrors, Multilayer Reflectors and Photonic Crystals. *Advanced Functional Materials*, 27(6).

Mizukawa, Y., Miyashita, Y., Satoh, M., Shiraiwa, Y., & Iwasaka, M. (2015). Light intensity modulation by coccoliths of *Emiliana huxleyi* as a micro-photo-regulator. *Scientific reports*, 5.

Yuan, W., Zhou, N., Shi, L., & Zhang, K. Q. (2015). Structural coloration of colloidal fiber by photonic band gap and resonant mie scattering. *ACS applied materials & interfaces*, 7(25), 14064-14071.

Zhao, Y., Xie, Z., Gu, H., Zhu, C., & Gu, Z. (2012). Bio-inspired variable structural color materials. *Chemical Society Reviews*, 41(8), 3297-3317.

בכתבה זו הראנו דוגמה למנגנון צבע שונה מהמנגנון המוכר המבוסס על בליעה והחזרה של צבע. הצגנו מנגנון צבעים מבניים המבוסס על החזרה והשתקפות. דוגמה לכך הייתה מספירי הים שהם בעלי גבישי גואנין פוטוניים. התכונות האופטיות של הצבעים המבניים בכלל ושל גבישי גואנין פוטוניים בטבע בפרט, יכולים להוות השראה לייצור גבישים פוטוניים מתכוננים שמצדם יכולים לשמש למגוון יישומים כגון חיישנים, זכוכיות וסיבים אופטיים. ישנם מחקרים התחלתיים שחוקרים פיתוחים אלו (Zhao, Xie, Gu, Zhu, & Gu, 2012; Mizukawa, Miyashita, Satoh, Shiraiwa, & Iwasaka, 2015). בתעשייה ובמדע יודעים לבנות גבישים פוטונים שניתנים לכיוון גם בצורה מכנית וגם בצורה חשמלית, אך בשלב זה אין יודעים לייצר גבישים שניתנים לכיוון על ידי אור. בנוסף באוניברסיטאות ברחבי העולם עובדים על הפקה של צבעים מבניים לצרכים של תעשיית הטקסטיל (Yuan, Zhou, Shi & Zhang, 2015; Diao, Liu, Toh, Shi & Zi, 2013). צבעים אלו עשויים לשמש בעתיד בתעשיית הטקסטיל לצרכים שונים, לדוגמה, לצורכי הסוואה.

תודות

ברצוננו להודות לפרופ' ליאה אדדי על השיחות המפרות, ועל ההשראה לכתיבת המאמר. תודה לפרופ' ליאה אדדי ולד"ר דביר גור על שיתוף תמונות מהמחקר ועל האישור להשתמש בתמונות שפורסמו במאמריהם.

רשימת מקורות

אדדי ליאה, (2016). **ביומינרליזציה - טכנולוגיות עתידניות בנות מאות מיליוני שנים** (YouTube) מסע הקסם המדעי. אוחר 30 ליולי 2017 מתוך: <https://www.youtube.com/watch?v=u1EafzaNsTw>

Denton, E. J., & Land, M. F. (1971). Mechanism of reflexion in silvery layers of fish and cephalopods. *Proceedings of the Royal Society of London B: Biological Sciences*, 178(1050), 43-61.