

## הפיסיקה של עור הזיקית וצבעיו

כידוע, לזיקית כושר החלפת צבעי העור תוך זמן קצר ביותר. יש הרואים שינויי צבעים אלה למטרות הסוואה. מאידך, יש ראיות רבות המצביעות על כך כי גורמים פיסיקליים וחברתיים שונים משפיעים על צבעים מסוימים. למשל, ידוע שתאורה חזקה או טמפרטורת סביבה גבוהה גורמים לתוספת צבע שחור. לעומת זאת שהייה בחושך ובקור גורמים לתוספת של צבע לבן. כמו כן ידוע שכאשר הזיקית מצויה בנוכחות זיקיות אחרות או אויבים, צבעיה משחירים או מלבינים בהתאם למצב. להחלפות צבעים אלה יש המתייחסים כאלו הנגרמים בגלל מצבי רוח. עד כמה שידוע לי, לא ברורות עדיין הסיבות הפיסיקליות לקיומם של הצבעים האחרים, כגון ירוק, כחול, צהוב וחום. במאמר זה אנסה לשפוך אור על התעלומות הרבות בצבעי עורה של הזיקית, באמצעות הסתכלות על עור הזיקית מנקודת מבט פיסיקלית-הנדסית.

### 1. התפקידים המכניים של עור הזיקית.

כידוע, הזיקית צדה בשיטת המארב את קורבנותיה המצויים במהלך היום על גבי עצים ושיחים. היא עומדת ללא ניע עד שנחת לידה חרק או קורבן אחר ואז - בהרף עין היא שולפת את לשונה הארוכה, מדביקה אליו את קצה לשונה העבה והדביק ומגלגלת חזרה את לשונה אל פיה. מאחר והיא שייכת למשפחת הזוחלים עליה לעבור מענף לענף בהליכה ולא בקפיצה או בתעופה. אך המעברים בין הענפים של העצים או השיחים עשויים להיות לעיתים צרים. לכן על הזיקית להתאים את מבנה גופה ואת כל התנהגותה לשתי עובדות יסודיות אלו: **שיטת המארב ומעברים צרים**. כדי לעבור במעברים צרים ומפותלים עליה לפחס מאד את גופה ולהגמיש את עורה במידה מירבית. בנוסף לכך, כאשר הזיקית עומדת זמן ממושך, אם בשעת מנוחה או בשעת המתנה ארוכה לטרף, צריך עורה להיות חזק ונוקשה במידה הדרושה כדי לעמוד בלחצים הפנימיים של פנים הגוף. מכאן אנו יכולים להסיק את **התפקיד החשוב ביותר של עור הזיקית: יכולתו לעבור תוך זמנים קצרים בין שני מצבים מכניים קיצוניים: א) גמישות מירבית. ב) נוקשות מרובה**. רק לאחר שנתקיימו תנאים מכניים אלה ניתן לדון בדרישות האחרות מעור הזיקית, כגון עמידות בשינויי תאורה וטמפרטורה קיצוניים, בשינויי לחות, ועוד. השאלה החשובה היא כיצד מורכב עור הזיקית כך שהוא יעמוד בתפקיד המכני החשוב הזה. על כך נדון בסעיף הבא.

### 2. המבנה הפיסיקלי הנדסי של עור הזיקית.

כאמור בסעיף הקודם, התפקיד החשוב ביותר של עור הזיקית הוא יכולתו לעבור תוך זמנים קצרים בין שני מצבים מכניים קיצוניים: א) גמישות מירבית. ב) נוקשות מרובה. הגמישות המירבית פירושה כאן שניתן להאריך או לקצר, לכופף ו/או לפתל את מעטפת העור בכל אחד מאזוריה - ללא תלות במה שקורה באזורים אחרים וללא תלות בגודל האזור, אם הגודל הוא כמו חוד של סיכה או מחצית הגוף. נוקשות מירבית של קטע מסוים פירושה שכל הקטע מתנהג כמקשה אחת - כמו קרש. כאשר דנים במעטפת **אורגנית**, ולא במעטפת אי-אורגנית, האמורה להיות גם קלה וגם חזקה, גוברת הסקרנות להבין כיצד מצליח הטבע ליצור מעטפת כה מתוחכמת. איני מכיר דוגמא למעטפת **מלאכותית** בעלת יכולת למעברים מהירים בין שני מצבים קיצוניים כאלה. בעקבות נסיונותי להבין, כפיסיקאי, את המבנה והצבעים של עור הזיקית חיפשתי דרך לתכנן "מעטפת קסמים" שכזאת. ההסבר ההנדסי-פיסיקלי שאציע להלן עשוי לתת הסברים גם לגבי המבנה והחומרים מהם מורכב עור הזיקית.

## 2.1 הרשת הגמישה למתיחה, כיווץ וכיפוף

כדי שמעטפת תהיה ניתנת למתיחה או לכיווץ בכל כיוון רצוי שהיא תהיה מורכבת בצורת רשת. אכן, ידוע כי בבסיס מעטפת העור של בעלי חיים, כולל האדם, מצויה רשת אורגנית המורכבת משרשראות (פולימרים) של חלבונים. כדי להבין את פעולת הרשת נדמיין לעצמנו קטע של רשת עשויה מנילון ובעלת חורים מלבניים. נכנה מצב זה בכינוי "מצב נורמלי". מתיחה או כיווץ הרשת בכיוון אחד משני האלכסונים של אחד המלבנים יגרום לעיוות הרשת. למשל, חלק מהחורים יקבלו צורת מקבילית. אם לאחר המתיחה או הכיווץ נשחרר את רשת הנילון היא לא תשוב למצבה הנורמלי. עיוות כלשהו ישאר. מידת העיוות תלויה במידת האלסטיות של חוטי הרשת. אם לחוטים אין אלסטיות כלל הרשת תשאר במצב המעוות. אם לחוטי הרשת יש אלסטיות גבוהה מדי, כמו למשל לסיב גומי דק, הרשת לא תשוב למצבה מייד אלא תתנדוד במשך זמן מה העשוי להיות ארוך. לכן בחרתי מראש ברשת נילון ולא ברשת גומי. כדי להשיב את רשת הנילון למצבה הנורמלי עלינו להפעיל פעולה מנוגדת בכיוון האלכסון השני. אך בכך אנו מפעילים כוח נוסף ומפסידים אנרגיה יקרה. האם יש דרך להחזיר את הרשת למצבה הנורמלי, מייד לאחר שמשחררים אותה, ללא הפעלת כוח נוספת. להלן מספר רעיונות שעלו בדעתי עד שמצאתי פתרון המניח לעת עתה את דעתי.

הרעיון הראשון היה לחבר קפיצים זעירים בין צלעות המלבנים. החסרון הוא שמערכת קפיצית כזאת עשויה להכנס לתנודות ממושכות מאד לפני שהיא תשוב למצב המנוחה הנורמלי. כמו כן, במקרה של תהודה (רזוננס) עשויה אמפליטודת התנודה לעבור גבול מסוים שמעבר לו יקרעו צלעות המלבנים והרשת תתפורר. לכן פתרון כזה אינו רצוי. בוודאי לא עבור רשת אורגנית. זאת עשויה אולי להיות גם הסיבה מדוע השרירים בגוף אינם קפיציים. כלומר ניתן לקצר אותם ולשחרר אך לא להאריך. אם השרירים היו קפיציים אזי כל תנועה של אבר בגוף היתה מלווה ברעידות בעלות תדירות התלויה בתכונות הקפיציות. אם למשל תיגע באצבעך בשריר הזרוע הוא לא יתנדוד כמו קפיץ אלא ישקע מעט ולאחר השחרור ישוב למצבו שלפני הנגיעה. לכן, הרעיון של קפיצי קישור אינו יעיל.

הרעיון השני שעלה בדעתי היה לחבר לכל צלע של אחד המלבנים הקטנים מגנט כך שאותם צדדי מגנט, למשל "צפון", יפנו פנימה. לכן אם מותחים את אלכסון המלבן ומתקבלת מקבילית, מתקרבים צדדים שווים של מצפנים זה לזה ונוצרת דחייה מגנטית המחזירה את הרשת למצבה הנורמלי. אלא שפתרון כזה עלול להתקל בהפרעות כאשר הרשת תמצא בקרבת מתכת או סלע הכולל כמות גדולה של ברזל אשר יסובב את המגנטים וישבש את יעילותם. לכן גם פתרון כזה אינו טוב עבור רשת אורגנית של בעל חיים האמור להיות צמוד לקרקע כגון ממשפחת הזוחלים. גם החלפת המגנטים במטענים חשמליים לא תעזור בגלל הפרעות פוטנציאליות של שדות חשמליים חיצוניים אשר עלולים לגרום לעיוות צלעות המלבנים והוצאת הרשת ממצבה הנורמלי מבלי שהופעל כוח מכני. לכן ידרש כוח מכני מיותר כדי להחזיר את הרשת למצב הנורמלי. לכן, גם רעיון זה אינו יעיל.

רעיון אחר שעלה בדעתי, ועשוי לקרב אותנו אל הפתרון האופטימלי הוא הרעיון הבא: נסתכל על חור מלבני מסוים ברשת. נחבר בין שתי הצלעות הקטנות של המלבן רצועה בעלת שתי שכבות מקבילות שבכל אחת יש מטען חשמלי מסוג אחר (שלילי או חיובי) כך שסך כל המטענים החשמליים מתקזזים. כלומר, הרצועה ניטרלית מבחינה חשמלית. כך ששדות חשמליים חיצוניים לא ישפיעו על הרצועה ועל הרשת. את השכבה העליונה של הרצועה נצמיד לצלע קטנה אחת של המלבן, למשל לצלע הימנית. את השכבה התחתונה נצמיד לצלע הקטנה הנגדית - השמאלית. עתה נראה מה קורה כאשר מותחים או מכווצים את המלבן בכיוון אחד האלכסונים, דהינו מפעילים כוח מכאני ליניארי. כתוצאה מכך מקבל המלבן צורת מקבילית אשר גורמת לכך ששתי השכבות של הרצועה ינועו קמעה אופקית זו ביחס לזו. השכבה העליונה תנוע מעט ימינה והשכבה התחתונה תנוע מעט שמאלה. כלומר, הוצאנו את הרצועה ממצב מנוחה שבו האנרגיה החשמלית הפוטנציאלית היא מינימלית. עקב כך נוצרת משיכה חשמלית הדדית של שתי שכבות הרצועה. לכן שתי השכבות, העליונה והתחתונה, תמשוכנה זו את זו עד שהן תשובנה למצב הנורמלי שלפני הפעלת הכוח הליניארי. לכן כאשר נשחרר את אחיזתנו מהרשת תאולץ המקבילית לחזור לצורת המלבן הנורמלית. אם נשים רצועות דו שכבתיות כאלו גם בין חורים מלבניים נוספים של רשת הנילון נוכל בעקרון

להחזיר את כל הרשת למצבה הנורמלי שלפני הפעלת הכוח הליניארי. כמובן, אין הכרח לשים רצועה בכל חור מלבני. מספר הרצועות וחלוקתן עשויים להיות תלויים בכמות המטען החשמלי שבכל אחת משכבות הרצועה, בחוזקה של הרשת ובגורמים פיסיקליים נוספים. ניתן גם לרכז באזור מסוים של הרשת כמות גדולה של רצועות, כך שהן תאכלסנה את כל המלבנים באותו אזור, בעוד שמלבנים באזורים אחרים ישארו ריקים. מה שחשוב הוא שתהיה כמות מספקת של רצועות כך שסך כל הכוח שהן תפעלנה יספיק כדי להשיב את הרשת למצבה הנורמלי. ניתן לשכלל את הפתרון עוד יותר על ידי כך שכל רצועה תכיל הרבה שכבות בעלות מטענים חשמליים מתחלפים. דהינו רצועה רב שכבתית. במקרה כזה אם השכבה התחתונה של הרצועה תמשך לצד ימין והשכבה העליונה לצד שמאל, ינועו גם שכבות הביניים בתנועה אופקית בצורה מדורגת. לרצועה רב שכבתית כזאת עשוי להיות כוח החזר גדול יותר מאשר לרצועה דו-שכבתית. זאת משום שעתה כל שתי שכבות התרחקו פחות זו מזו מאשר במקרה של רצועה דו שכבתית. וכידוע, הכוח החשמלי הפוך למרחק בין המטענים החשמליים של שתי השכבות. (לא למרחק בריבוע כי מדובר בשכבות ולא במטענים נקודתיים). פתרון כזה של רצועת שכבות לא יושפע מנוכחות שדות מגנטיים או חשמליים חיצוניים ולא יגרום לתנודות בהן נתקלנו במקרה של הקפיצים.

בפתרון זה השתמשנו ברצועת שכבות בעלי מטענים חשמליים מנוגדים מתחלפים. זאת כדי להעזר במשיכה החשמלית הישירה (קולומבית) בין כל שתי שכבות, כך שהשכבות תמשוכנה אחת את רעותה במידה ומרחיקים אותן במקצת זו מזו. דוגמא מוחשית לרצועה כזאת יכול להיות גביש יונים כגון מלח שולחני NaCl. אולם הכוחות הדרושים להזזת שכבה אחת ביחס לשכבה סמוכה לה הם גדולים.

אולם, אין הכרח להשתמש דווקא בכוח משיכה חשמלי ישיר. ניתן לחשוב גם על סוג כוחות אחר כמו למשל כוחות ואן-דר-וואלס (Van der Waals) שבין מולקולות ניטרליות מבחינה חשמלית. כוחות אלו חלשים בהרבה מהכוח הקולומבי. שימוש בשכבות המושכות זו את זו על בסיס כוחות ואן-דר-וואלס יחייב הגדלה משמעותית במספר השכבות שברצועה ביחס למספר השכבות בגביש יוני. על אופיים של כוחות ואן-דר-וואלס ניתן לקרוא למשל בסעיף 2-5 בספר הלימוד University Chemistry [1]. נוכחים שם שקיים מרחק מינימלי מסוים בין שתי מולקולות ניטרליות אשר מתחת לו המולקולות דוחות זו את זו בחוזקה. אך במרחק הגדול אך במקצת ממרחק מינימלי זה – הן מושכות אחת את השניה. המרחק המינימלי הוא בסביבות הסכום של שני רדיוסי המולקולות, אם המולקולות כדוריות. המרחקים שבהם מולקולות ניטרליות עשויות למשוך זו את זו הם מסדר גודל של מספר אנגסטרומים. (1 אנגסטרום שווה  $10^{-8}$  מ"מ). כדי לקבל מושג על אופי הרצועה הרב שכבתית נניח לדוגמא שכל שתי שכבות מולקולות של הרצועה מושכות אחת את השניה כאשר הן מוסטות זו ביחס לזו במרחק של 1 אנגסטרום ביחס למצב המנוחה ביניהן (המצב שבו האנרגיה הפוטנציאלית מינימלית). נניח גם שהרצועה מקשרת בין הצלעות הקטנים של מלבן שאורכו  $10^{-2}$  מ"מ ושמעונינים לאפשר לרצועה להחזיר את המלבן למצב הנורמלי לאחר שהרחיקו את הצלעות הקטנות באחוז אחד בלבד, דהינו במרחק  $10^{-4}$  מ"מ. כלומר, השכבה העליונה של הרצועה תהיה מוסטת בשיעור של  $10^{-4}$  מ"מ ביחס לשכבה התחתונה. חישוב פשוט מראה שדרושות 1000 שכבות ברצועה כדי לאפשר החזרת המצב לקדמותו לאחר תזוזה בשיעור כזה. אם עובי כל שכבה הוא למשל 5 אנגסטרום נקבל שעובי הרצועה הוא חצי אלפית המ"מ. כלומר הרצועה הרב שכבתית שלנו תהיה בדוגמא זאת באורך מאית מ"מ ובעובי חצי אלפית מ"מ והיא תכיל 1000 שכבות. כל רצועה כזאת יכולה להחזיר לקדמותו תזוזה של  $10^{-4}$  מ"מ. שורה של רצועות כאלה המחוברות בצורה טורית יכולה להכפיל את מידת ההזזה המוחזרת לפי מספר הרצועות. למשל, אם 100 רצועות מחוברות בטור הן יכולות לספק אלסטיות עד כדי תזוזה של  $10^{-2}$  מ"מ. לכן בעיקרון ניתן להשיג אלסטיות לכל טווח תזוזות שרוצים על ידי כמות הרצועות הרב שכבתיות, אופן חיבורן ואיכותן.

כלומר יש בידינו פתרון עקרוני לבעיית המתיחה או הכיווץ של הרשת, דהינו להפעלת כוח מכאני ליניארי על הרשת. אך מה אם מעונינים שתהיה אפשרות לאלסטיות גם כתוצאה מסיבוב הרשת על ידי דחיפת שני קצותיה בכיוונים מנוגדים במישור הרשת - כלומר יצירת מומנט סיבוב. גם במקרה הזה יקבלו חורי הרשת צורות של מקבילית במקום המלבנים שבמצב הנורמלי. אלא שעתה

השכבות של הרצועה תסתובבנה אחת ביחס לשניה, בדומה לחבילת קלפים כאשר מחזיקים אותה במרכז ופותחים אותה כמו מניפה. גם עתה תתקבל משיכה הדרגתית בין השכבות ואם היא תהיה חזקה דיה תוכל הרשת לשוב למצבה המקורי.

נקודה נוספת עליה ראוי להתעכב היא הדרך המדויקת שבה מקשרים בין רצועה רב שכבתית האמורה להיות קשיחה יחסית, לבין רשת העשויה מסיבים עדינים, כמו למשל סיבים אורגניים. כלל ידוע הוא שלא רצוי לקשר בין שני דברים בעלי דרגות קשיות רחוקות מאד. למשל, לא רצוי לחבר באופן ישיר חוט תפירה למוט ברזל. משום שבהפעלת כוח קטנה מאד (ביחס לחוזקו של הברזל) ינותק הקשר באזור החיבור. אם למרות הכל רוצים לבצע חיבור של חוט תפירה למוט ברזל ניתן לעשות זאת באמצעות סדרת חוטים מתווכים בעלי דרגות קשיות עולות בהדרגה מזאת של חוט התפירה עד זאת של הברזל. הצורך בגורמי תיווך קיים גם בחי. למשל, השרירים הרכים יחסית מחוברים לעצמות הקשוחות דרך סיבי הגידים. במקרה שלנו ניתן להכניס כמות של רצועה רב שכבתית לתוך תא עם מעטפת בעלת דרגת קשיות שבין זו של הרצועה לבין זו של סיבי הרשת העדינים. בתוך התא תהינה הרצועות מחוברות אל דפנותיו באמצעות רשת סיבים בדרגת קשיות שבין זאת של מעטפת התא לבין זאת של הרצועות. אם יש צורך ניתן לשלב עוד רשתות ביניים פנימיות של סיבים בדרגות קשיות משתנות באופן הדרגתי. גם את התא עצמו רצוי לקשר מבחוץ אל הרשת העדינה באמצעות רצועות סיבים בעלי דרגות קשיות משתנות. תא כזה יכול לשמש לא רק את הרשת אשר במישורה הוא מצוי, אלא גם רשתות סמוכות. לכן צורתו של התא עשויה להיות כדורית או אפילו סגלגלה. הצורה הסגלגלה תתקבל אם יש יותר קשרים של התא אל הרשת החיצונית המצויה במישור שלו מאשר אל הרשתות הסמוכות. ניתן לצפות שהרשתות הסמוכות, אלה שמעל ומתחת לרשת המרכזית, תהיינה מחוברות לתא הסגלגל באמצעות רשתות פחות מסיביות. כך שמצד אחד התא יוכל לזוז בצמוד לתנועות הרשת המרכזית אליה עיקר חיבורו, ומצד שני לא ינותקו הקשרים עם הרשתות הסמוכות הללו. אם למשל יש שלוש שכבות של רשתות הסמוכות למעטפת החיצונית (האפידרמיס בעור הזוחלים למשל) ניתן לצפות שהתאים הסגלגלים הללו ימצאו במישור של הרשת השניה כך שהם יתפקדו עם כל שלוש הרשתות.

לאור הנאמר לעיל, איני מוציא מכלל אפשרות שבעורם של זוחלים מסוימים (לאו דווקא בזיקית) משמשים תאי האריתרופורים בתור תאים כנ"ל המכילים רצועות רב שכבתיות העוזרות לקיום האלסטיות למתיחה, כיווץ וכיפוף של שכבות העור הסמוכות לאפידרמיס. על כך נדון בהרחבה בפרק הבא.

## 2.2 רשת הגמישה לפיתול

עד עתה דנו בשינויי צורה של הרשת באותו מישור שלה. מה קורה אם מעונינים **לפתל** את הרשת. כלומר כאשר גורמים לכך שהצלעות של המלבנים ברשת אינם באותו מישור. אם כל השכבות של הרצועה הרב שכבתית הנ"ל מקבילות ידרש כוח רב כדי לבצע פיתול כזה. כי נניח למשל שרוצים לפתל את הרשת כך שהצלע הימנית של המלבן יעלה מעל למישור המקורי של הרשת בעוד שהצלע הנגדית שלו תרד מתחת לאותו מישור. לכן הקצה של השכבה העליונה, הצמודה כאמור לצלע הימנית של המלבן, יתרומם. ואילו הקצה השמאלי של השכבה התחתונה, הצמודה לצלע השמאלית של המלבן, ירד. לכן, בגלל המשיכה שבין השכבות, **כולן** תקבלנה נטיה כלפי מטה מימין לשמאל, אך הן תשארנה מקבילות ללא כל שינוי גאומטרי יחסי בין השכבות. לכן לא יוצר המכניזם אשר יחזיר את הרשת למצבה הנורמלי. כל זה יקרה אם מידת המשיכה ההדרגתית בין שתי שכבות תהיה אחידה לכל אורך הרצועה. אך אם למשל בצד הימני של הרצועה תהיה משיכה הדרגתית גדולה יותר מאשר ביתר חלקי הרצועה - למשל בגלל צפיפות גדולה יותר של מולקולות או קיומן של מולקולות ניטרליות בעלות עוצמת משיכה הדרגתית גדולה - ימשכו הצדדים הימניים של שכבות הרצועה בעוצמה רבה יותר והמרווחים ביניהם יהיו קטנים יותר מאשר בצד שמאל. כמו כן יהיה קשה יותר להפריד בין

השכבות בצד ימין. במקרה כזה, כאשר תתרומם הצלע הימנית של המלבן, ביחס לצלע השמאלית שלה, יפתח הצד השמאלי של הרצועה כמו שנפתחים דפי ספר. קצות השכבות באותו צד שמאלי יתרחקו במקצת האחד מהשני ונקבל את השינוי היחסי הדרוש בין השכבות כדי שמכניזם ההחזרה למצב הנורמלי יופעל. יוצא מכך שהצורה החיצונית של הרצועה הרב שכבתית הדרושה למטרת הפיתול היא צורת **מנסרה**.

צורת המנסרה תענה גם על שתי הבעיות הקודמות בהן טיפלנו: הפעלת כוח מכאני ליניארי והפעלת מומנט הסיבוב. במקרה של הכוח המכאני הליניארי - הכוחות המופעלים על שכבות הרצועה הם בכיוון מישור השכבה ולכן הם **אנכיים** לכיוון התנועה האופקית היחסית בין השכבות. לכן אין חשיבות לפיזור צפיפות כוחות המשיכה ההדדיים אלא רק לכוח המשיכה הכולל ביו השכבות. הדבר דומה לחיכוך שנוצר במקרה שדוחפים ארגז המלא רק בצדו האחד על פני הרצפה. החיכוך בין הרצפה והארגז נקבע על ידי הכוח הכולל שהארגז מפעיל על הרצפה, ולא על חלוקת המטענים בתוכו. לגבי מומנט הסיבוב - קל לראות שהמנסרה אכן תהיה יעילה אם נעזרים בדוגמת חבילת הקלפים הנ"ל אך מחזיקים את החבילה לא במרכז אלא בקצה התחתון שלה. פתיחת הקלפים בחלק העליון בתנועת סיבוב תיצור דוגמת מניפה ונקבל את התזוזה היחסית הדרושה בין שכבות הרצועה. כלומר, המנסרה הרב שכבתית אכן עונה על שתי הבעיות הקודמות. אמנם מנסרה רב שכבתית עשויה להיות יותר מסובכת לבנייה אולם אם היא קיימת היא מייצרת את הצורך ברצועה הקובייתית של הסעיף הקודם.

אנו נוכחים שלפתרון המנסרה הרב שכבתית יש יתרונות רבים. היא מאפשרת אלסטיות בפיתול בנוסף לאלסטיות במתיחה, כיווץ וסיבוב. אולם יש לה חסרון מהותי. היא מגבילה את תנועת הפיתול רק לכיוון אחד. למשל אם היא מתוכננת כנ"ל להרים את הצלע הימנית מעל השמאלית ונרצה שהיא תרים את הצלע השמאלית מעל הימנית נתקל בהתנגדות של השכבות הפנימיות שבתוך המנסרה. זה כמו ללחוץ על ספר סגור בכיוון הסגירה. כדי להתגבר על מינוס זה של המנסרה ניתן להציב מספר מנסרות בכיוונים שונים. כלומר תדרש מערכת מנסרות המסודרות בצורה מוגדרת. למשל טור של מנסרות הפוכות לסרוגין בכיוון, או סידורים אחרים בהתאם לטיב הרשת ולצרכים המקומיים. לא מן הנמנע שיהיו הבדלים מבניים מסוימים בין המנסרות המאפשרות פיתול בכיוון אחד לבין אלו המאפשרות פיתול בכיוון הנגדי.

כל זאת כאשר הרשת עצמה מורכבת מחומרים ומבנה אחידים. אולם אם אין אחידות ברשת יתכן שידרשו סוגים שונים של מנסרות רב שכבתיות. למשל, אם הסיבים הרחוביים של הרשת שונים בהרכבם ובכוסר מתיחותם מהסיבים האורכיים שלה, ידרש סוג מנסרות אחד עבור פיתול סביב ציר בכיוון הרחובי וסוג מנסרות שני עבור פיתול סביב ציר בכיוון האורכי. סביר שיהיה דמיון מסוים בין שני סוגי המנסרות. אולם שינויים מסוימים יתבקשו כדי להתאים כל סוג לצרכים המיוחדים באזור ברשת בו עליו לתפקד.

לאור כל מה שראינו עד כה אנו יכולים לאפיין עתה את הדרישות מאותה רצועה רב שכבתית. ראשית, עליה להיות מורכבת משכבות אשר יש בהן סדר מוגדר בצורת שריג. שנית, השריג הזה צריך להיות חזק יותר מצלעות הרשת. מאחר ואנו מתכוונים בסופו של דבר לרשת אורגנית (של עור הזיקית) - רצוי שהשריג הזה יהיה גביש. אך לא טוב אם הגביש קשוח מדי, אחרת השכבות לא ינועו בקלות זו ביחס לזו כאשר יופעל על הרשת כוח הנובע רק משריריה של הזיקית. כדי לקבל מושג על עוצמות המשיכות ההדדיות בגבישים השונים נתבונן בטבלה 1-3 ב [1]. רואים שהאנרגיה הדרושה להפרדת יונים מגביש יונים היא בסדר גודל של **מאות** kcal/mol. כך גם לגבי גבישים קוולנטיים, כגון יהלום, אשר דרוש להפרדת אטומים מהם סדר גודל של מאות kcal/mol. בגבישים מתכתיים מדובר בסדר גודל של **עשרות** kcal/mol להפרדת אטומים, בעוד שבגבישים מולקולריים האנרגיה הדרושה להפרדת מולקולות היא מסדר גודל של **יחידות בודדות** של kcal/mol. לכן גבישים **מולקולאריים** עשויים לענות על שתי הדרישות הללו. אמנם בגבישים מולקולריים הכוחות המקשרים בין שכבות המולקולות הם כוחות ואן-דר-ואלס, ולא כוחות חשמליים ישירים. אך כאמור, גם בגבישים מולקולאריים ניתן לדבר על משיכה הדדית בין שכבות של מולקולות ספציפיות. תכונה נוספת הנדרשת מהגביש שלנו, כאמור, הוא שצורתו תהיה של מנסרה. אם הגביש הוא גם שקוף יש

לצפות שתהיה שבירה של קרני אור מסוימים בכיוונים מוגדרים, בדומה לנפיצת אור ממנסרת זכוכית. כמו כן עשויים להיות יותר מסוג אחד של גבישים מולקולריים בצורת מנסרה. סדר המנסרות, מספרם ואיכותם יקבעו את שילובי הצבעים שיחזרו מהם כאשר תעבור דרכם קרן אור מהשמש.

גם כאן רצוי להכניס את המנסרות לתוך תאים מתאימים ולחבר ביניהן לבין הרשתות בהתאם לכללים עליהם דננו בסעיף הקודם. דהינו, תאים סגלגלים המפוזרים ברשתות ובאזורים העשויים להיות נתונים לפיתולים בכיוונים שונים ודרושה בהם אלסטיות לפיתול כדי שאותם אזורים ישובו למצבם הנורמלי שלפני פעולת הפיתול. אם יש שלוש שכבות רשתות אשר יש קשר ביניהן, אין הכרח שהמנסרות תהיינה דווקא ברשת העליונה, אלא הן יכולות להמצא גם ברשת התחתונה. בעור הזוחלים ישמרו תנאי הטמפרטורה טוב יותר ברשת הפנימית ביותר. תנאים אלה דרושים כדי שהגבישים המולקולריים, העשויים להיות מושפעים מאד משינויי טמפרטורה, לא יצאו מהתחומים המוגבלים של פעילותם הנדרשת לתפקודם כרצועות רב שכבתיות המאפשרות אלסטיות, על פי המכניזם שתואר בסעיפים הקודמים.

אנו נראה בהמשך שבעור הזיקית עשויים גבישי הגואנין להחליף את הגבישים המנסרתיים הנ"ל ותא הגואנופור עשוי להחליף את התא הסגלגל הנ"ל.

### 2.3 סיכוך במערכת רבת רשתות

בסעיף הקודם עסקנו בעיקר ברשת בעלת שכבה אחת וראינו כיצד ניתן לדאוג לכך שהרשת תהיה גמישה לחלוטין, כלומר שניתן יהיה להפעיל עליה מידה מסוימת של כוח שימתח ו/או יכווץ ו/או יסובב ו/או יפתל אותה, ולמרות כל זאת - לאחר הסרת הכוח היא חוזרת למצבה הנורמלי ההתחלתי שלפני הפעלתו. מצאנו שאם אין צורך לטפל בנושא הפיתול ניתן להסתפק בתאים סגלגלים המחברים לרשת ומכילים רצועות רב שכבתיות. כמו כן מצאנו שאם דרושה גמישות גם כנגד פיתולים - רצוי שהתאים הללו יכילו גבישים מולקולריים דמויי מנסרה. אולם רשת אחת בלבד בעלת סיבים עדינים, כדוגמת רשת אורגנית, עשויה להיות חלשה ביותר. עקב כך היא עלולה להקרע בקלות מבלי שתוכל למלא את תפקידיה. כדי להתגבר על חולשה זאת רצוי שתהיינה מספר רשתות כך שקווי רשת אחת לא יחפפו את קווי הרשת הסמוכה לה. כלומר אנו זקוקים **למערכת רבת רשתות שסיביהם מצטלבים**. במערכת רשתות כזאת מתעוררת שאלה חשובה: כיצד לדאוג לכך שהרשתות לא יקרעו על ידי חיכוך ביניהן. חיכוך כזה יכול לקרות למשל כאשר מכופפים את מערכת הרשתות. כדי להמחיש את התופעה הזאת נדמיין שבידינו שתי חתיכות גומי עבות בעלות אותו אורך. נשים את האחת על גבי השניה, נחזיק בקצוות ונכופף כלפי מטה כך שיתקבל קימור. מדידת אורך חתיכות הגומי לאחר הכיפוף תגלה לנו שהחתיכה העליונה ארוכה יותר מאשר התחתונה. כלומר שבמהלך הכיפוף התארכה החתיכה העליונה. תוך כדי ההתארכות נעו חלקים שלה על גבי החתיכה התחתונה ונוצר ביניהן חיכוך. אם נשוב על תרגילי הכיפוף הללו פעמים רבות יתברר לנו לבסוף שבאיזור המגע בין שתי החתיכות יש הרס של חומר, או במילים אחרות - שחיקה, כתוצאה מהחיכוך. כיצד ניתן למנוע את השחיקה או לפחות להפחית אותה במידה משמעותית.

אחת הדרכים היעילות היא באמצעות כדוריות קטנות, או גופים סגלגלים (אליפסואידות) שהציר הראשי שלהן אנכי לכיוון תנועת החיכוך כאשר הן מצויות בין שתי חתיכות הגומי. חשוב להבין לעומק מדוע נדרשות דווקא צורות כדוריות או סגלגלות - ולא למשל קוביות זעירות. כאמור, בעת הכיפוף מבצעת חתיכת הגומי העליונה דרך ארוכה יותר מאשר החתיכה התחתונה. החיכוך נוצר כתוצאה מהפרש הדרכים שעושות שתי החתיכות. אם נחלק בדמיונו את שתי חתיכות הגומי הצמודות להרבה קטעים - למשל על ידי קווי רדיוס מרובים היוצאים ממרכז מעגל הכיפוף - ניווכח שבכל קטע קטן כזה קיים הפרש דרכים זעיר בין קטע החתיכה העליונה לקטע החתיכה התחתונה. נניח ששמים כדורית קטנה כנ"ל בין כל שני קטעי גומי כאלה. בעת הכיפוף היא מתגלגלת במידה כזאת שהיקף שלה עובר את הפרש המרחקים שבין שני הקטעים. כלומר, אם קיים חיכוך - הוא בין הכדורית ובין הגומי, ולא בין חתיכות הגומי עצמן. אם היינו שמים קוביה במקום כדורית היו עשויות

לקרות אחת מהשתיים. או שהקוביה היתה נגררת לאורך כל הדרך, ואז אחד משני קטעי הגומי היה נשחק עקב חיכוך גבוה. או שהקוביה היתה מתגלגלת. במקרה כזה צלעות הקוביה היו חודרות לתוך הגומי והחיכוך היה גדול פי כמה, אולי אפילו עד כדי מניעת הכיפוף. מה גם שהיה נגרם הרס גדול במידה רבה לחתיכות הגומי. לכן רצוי שהגורם המצוי בין שתי חתיכות הגומי יהיה בצורה כדורית, או סגלגלה, כמוסבר לעיל. בנוסף לזאת, העומס שמפעילות חתיכות הגומי על הגופיפים המצויים ביניהן עלול למחוץ את אותם גופיפים. לכן הגופיפים צריכים להיות חזקות יחסית. הצורה הכדורית או הסגלגלה מוסיפה חוזק רב לאותם גופיפים. הדבר דומה לתפקידם של מיסבים כדוריים ממתכת המצויים במכונות שונות למניעת החיכוך בין חלקיהן. כידוע, גם שמן מונע חיכוך. אך בחינה מעמיקה של השמן מגלה שהוא מורכב מגרגרים כדוריים או סגלגלים זעירים המצויים בתמיסה המתאימה לשם שרידותם. גרגרים אלה מתגלגלים כאשר השמן מפריד בין שני חלקי מתכת, הנעים זה כלפי זה תוך כדי מגע. הצורה הכדורית או סגלגלה משרתת לכן, שתי מטרות. ראשית את המטרה העיקרית של גלגול כנ"ל להקטנת החיכוך. שנית, גוף כדורי חזק יותר כנגד עומסי לחיצה. הדבר מוכר לנו, למשל, מחוזקם של קשתות בגשרים וכיפות של מבנים ארכיטקטוניים רבים.

בנוסף לכך, חלקי הגומי הנוגעים בכדורית משיקים כל העת לכדורית. לכן כמעט ואין חיכוך בין הכדורית וחתיכות הגומי. (כידוע, חיכוך נוצר בין שני מישורים הנעים במקביל האחד ביחס לשני). בכך מנענו את שחיקת הגומי. ומה לגבי הכדורית. אמנם החיכוך על שפת הכדורית קטן מאד, משום שהכוח המכני הפועל עליה אנכי למשיק הכדורית בנקודת המגע עם הגומי, אולם גם קיומו של חיכוך זעיר ביותר עלול להרוס את הכדורית לאחר חיכוכים רבים. החיכוך הזעיר על פני הכדורית פירושו שבנקודת המגע הרגעית יש כוח אופקי על השכבה העליונה של הכדורית. כדי שהשכבה העליונה לא תקרע דרושה מהכדורית **נוקשות לגזירה** (shearing). בכדורית מתכת מושגת הנוקשות לגזירה על ידי כוחות התאחיזה הגדולים בין מולקולות המוצק.

כאשר מתייחסים לרשתות אורגניות, הצורך בגורמים המונעים חיכוך גדול עוד יותר היות וחיכוך עלול לגרום לקריעת רקמות פנימיות ולהפסקת תפקודן וכל הקשור אליהן. לכן, יש לצפות שבין כל שתי שכבות אורגניות, האמורות לנוע אחת ביחס לרעותה, יהיו תאי סיכון מתאימים. גודל התאים וצורתם תלויים בטיב השכבות ובאופי התנועות היחסיות ביניהם. יש לצפות שתאי סיכון אלה יהיו מורכבים מחומרים שומניים.

בפרק הבא נראה שהתאים הקסנתופורים עשויים לשמש כמונעי חיכוך בין הרשתות האורגניות.

### 2.3 חיזוקים במערכת רבת שכבות רשתיות

במערכת רבת שכבות אורגניות, כגון עור של בעל חיים, עשויים להיות מקרים בהם חשוב מאד שהמערכת תהיה קשיחה עד כמה שניתן כך שכל השכבות יתנהגו כגוף אחד, דהינו ללא תנועה יחסית ביניהן. אצל הזיקית למשל על העור להיות חזק ונוקשה כאשר היא עומדת זמן ממושך, אם בשעת מנוחה או בשעת המתנה ארוכה לטרף, כדי לעמוד בלחצים הפנימיים של הגוף. אם עורה לא יהיה נוקשה דיו הוא יסדק ולאחר מכן יקרע. בנוסף לכך ראינו שאצל הזיקית דרושה גם גמישות של העור כאשר היא עוברת במעברים צרים ומפותלים. כלומר יש כאן שתי דרישות מנוגדות: קשיחות גדולה וגמישות מירבית, אשר ביניהן צריך עור הזיקית לתמרן בהתאם למצבים המשתנים תוך פרקי זמן קצרים. איזה מנגנון יכול לאפשר למערכת רשתות רבת שכבות לגרום לנוקשות מירבית בעת הצורך ולהחליף את הנוקשות בגמישות מירבית תוך פרק זמן קצר ביותר. כדי לענות על כך נראה את ההסברים הבאים

נניח שאנו לוקחים חמש מפיות נייר דקיקות (למשל מסוג טישו) ושמים אותן האחת על גבי רעותה. קיבלנו חמש שכבות של מעין רשתות דקיקות בעלות חורים זעירים ביותר אשר ניתן לגלות אותם בעזרת מיקרוסקופ. נכנה מצב זה בשם "המצב הנורמלי". ניתן להיווכח שמערכת זאת נוחה מאד

לשינויים. אנו יכולים לקפל אותה לצורת כדור, לפרוש אותה חזרה, לסובב ולפתל אותה ככל שנרצה. אמנם היא לא תשוב למצבה הנורמלי באופן עצמאי, ולכן המערכת הזאת אינה נקראת גמישה. אך אם נצרף לכל שכבה כמות מספקת של תאים המכילים רצועות רב שכבתיות כנ"ל ו/או גבישים מולקולריים מנסרתיים כנ"ל, ונוסיף בין השכבות כמות מספקת של תאים בעלי חומרי סיכה שומניים כנ"ל, תתקבל מערכת רבת שכבות שהיא גם בעלת גמישות מירבית. אך האם המערכת הגמישה הזאת יכולה להפך בן רגע לחזקה ונוקשה, ולאחר מכן לחזור בן רגע למצב של גמישות מירבית. לשם כך עלינו להוסיף דבר מה למערכת הזאת. הדבר הזה צריך לגרום לכך שכל השכבות תהיינה כמקשה אחת. דהיינו, כל תזוזה של שכבה אחת תגרוור תזוזה מקבילה של כל יתר השכבות (זאת תכונתו של מוצק). דרישה נוספת ממערכת מוקשה היא שלא יהיה ניתן להאריך, לקצר, לכופף או לפתל חלק כלשהו של המערכת. בקיצור, מגובר בתכונות של קרש אחיד.

אחד הרעיונות הראשונים העשויים לעלות על הדעת לפתרון הבעיה הוא שזירה בתוך הניירות של רשת ענפה וצפופה של חוטי מתכת קשיחים, כך שהם יקשרו הן את האזורים השונים בכל שכבת נייר והן את שכבות הנייר עצמן. למעשה אנו יוצרים בכך מערכת רב שכבתית נוקשה המשולבת בתוך מערכת רב שכבתית גמישה. אולם המינוסים של רעיון כזה גלויים לעין: (א) הביצוע של השילוב אינו פשוט. (ב) הביצוע עשוי לקחת זמן רב. (ג) כדי להחזיר את המערכת למצב הגמיש יש צורך למעשה להוציא את כל חוטי המתכת. אך אז שוב עולים אותם שני מינוסים ראשונים: קושי בביצוע וזמן רב. לכן הרעיון הזה אינו פותר את הבעיה שלנו. רעיון אחר העשוי לעלות על הדעת הוא למרוח את הניירות בחומר דביק כלשהו אשר עם התייבשותו יקנה למערכת את הקשיות הדרושה. המינוס העיקרי של רעיון זה הוא שכאשר נרצה להחזיר את המערכת למצב הגמיש נצטרך להשתמש באנטי-דבק שירכך את הדבק ויסיר אותו. זאת כמובן מבלי לפגוע בנייר. איני יודע אם קיימים דבקים ואנטי-דבקים כאלה אולם גם אם הם קיימים ידרשו כל הפעולות הללו זמן רב. לכן גם רעיון זה אינו טוב.

ניתן לחשוב על רעיון יצירתי המשלב את שני הרעיונות האחרונים: נשזור בתוך המערכת הגמישה של הניירות סיב ארוך, חלול וגמיש (כגון חוט ניילון דקיק) כך שהוא יגיע לכל האזורים בכל השכבות ויחבר גם בין השכבות עצמן. קיבלנו למעשה שתי מערכות רב שכבתיות גמישות המשולבות ביניהן. לכן כל השילוב אף הוא נותן מערכת רב שכבתית גמישה. את אחד הקצוות של הסיב הארוך נאטום. את הקצה השני נכניס למיכל גמיש ואטום שיכיל חומר נוזלי. החומר הנוזלי צריך להיות כזה שהוא יהיה מסוגל לעבור תוך זמן קצר, למשל תוך דקה, ממצב נוזלי למצב מוצק - ושלאחר מכן יהיה ניתן בדרך כלשהי להחזירו למצב נוזלי, למשל על ידי חימום קל. כאשר נרצה שהמערכת הרב שכבתית הגמישה הזאת תהפך לנוקשה נלחץ על המיכל הגמיש או נחמם אותו. החומר הנוזלי יזנק יתפשט לתוך הסיב הארוך, ימלא אותו לכל אורכו וכעבור זמן קצר יתקשה, למשל על ידי כך שהחומר יתקרר. עתה כל המערכת הפכה לנוקשה. כאשר נרצה לאחר מכן להשיב למערכת את גמישותה יהיה עלינו להשיב את החומר שבתוך הסיב למצב נוזלי, למשל על ידי חימום המערכת, ולתת לו לזרום חזרה אל המיכל, או לינוק אותו, למשל באמצעות ואקום או בדרך אחרת. יש לפתרון כזה שני חסרונות בולטים: (א) כדי למלא את כל הסיב הארוך דרוש לחץ רב על המיכל. (ב) אם הסיב הארוך נקרע בנקודה כלשהי - כל המערכת יוצאת מכלל פעולה. כדי להתגבר על שני חסרונות אלו ניתן לחשוב על שימוש במספר מיכלים קטנים, שיהיו מחוברים באזורים שונים בתחתית המערכת הרב שכבתית הגמישה של הניירות שלנו, כך שלכל מיכל קטן מחוברות שלוחות של סיבים בקטרים שונים, המגיעים לחלקים השונים של כל שכבות הנייר שבסביבת אותו מיכל. כלומר התגברנו עקרונית על שני החסרונות הנ"ל. בנוסף לכך יש בידינו מערכת הניתנת להקשחה באזורים ספציפיים. כאשר נרצה לחזק חלק מסוים של המערכת הרב שכבתית - ולא את כולה - נוכל ללחוץ, או לחמם, רק את המיכל הסמוך לאותו איזור. בנוסף לכך, אם דואגים שיהיו הבדלים בקטרים של הסיבים ובצפיפותם ניתן לתמרן עם דרגות הקשיחות בכל איזור בהתאם לצורך.

כלומר, עשינו צעד גדול בכיוון הפתרון אך עדיין קיימת בעיה מהותית: מידת הקשיות תלויה במידת החום. לכן פתרון כזה אינו יכול לשמש במערכת אורגנית כמו זאת שבעור הזיקית העומדת זמנים ארוכים בחום ובשמש בעת שהיא מחכה לקורבנותיה. אי לכך, עלינו לחפש דרך לשכלל את הרעיון. הדרך העולה בדעתי היא להחליף את החומר הנוזלי שבמיכל בתערובת סמיכה של אבקת גרגרים



מוצקים המעורבת עם מעט נוזל שבו גרגרי האבקה אינם מסיסים. עתה, כאשר נלחץ על המיכל הגמיש תתפשט האבקה הסמיכה בתוך שלוחות הסיבים ותקשיח אותם. מידת ההקשחה תלויה בכמות האבקה שתגיע לכל סיב ובעוצמת הלחץ הפנימי שיוצר המיכל הגמיש והאטום כאשר הוא לחוץ על ידי גורם חיצוני. כאשר ישוחרר הלחץ החיצוני מהמיכל יחזור החומר שבסיבים אל תוך המיכל, בשל יניקת ואקום, והמערכת תשוב להיות גמישה. כלומר מצאנו פתרון שמאפשר ליצור נוקשות של המערכת על ידי יצירת לחץ מכני על המיכל הגמיש. אם בנוסף נדאג שנוזל התערובת המכיל את האבקה יהיה גם בעל מקדם התפשטות גבוה בחום, תופעל השיטה לא רק בעקבות לחץ על המיכל אלא גם בעקבות עליית הטמפרטורה שלו.

הבה ננסה לחשוב מהן התכונות הנדרשות מהאבקה שבתוך הנוזל. רצוי שגרגרי האבקה יהיו זעירים ושלא ידבקו זה לזה. אחרת תנועתם בתוך הסיבים הדקיקים תוגבל ויגרמו "פקקים". מאותה סיבה חשוב גם שלא תהיה משיכה בין הגרגרים לבין החומר ממנו מורכב הסיב. צורות הסיבים מכתיבות את צורות החתכים של הגרגרים, כאשר רצוי שהם יהיו בעלי אותן צורות חתכים של הסיבים. רק כך הם יתפסו ממש את כל נפח הסיב ויכללו להקשות אותו במידה הנדרשת. בנוסף, הצורה והמבנה של הרשת הרב שכבתית בכל אזור תכתיב את המבנה והצורה המועדפים של שלוחות הסיבים באותו איזור. למשל אם חוטי הרשתות באיזור מסויים הם בעלי חתך עגול, רצוי שגם שלוחות הסיבים באותו איזור יהיו בעלי חתכים עגולים. זה גורר שגרגרי האבקה יהיו בעלי צורות כדוריות או סגלגלות. לעומת זאת, באיזור שבו הרשת המורכבת מחוטים שטוחים עדיף לשים סיבים שטוחים ולא עגולים. אם הסיבים בעלי חתך מצולע - כגון מלבן, ריבוע, משושה וכו' - רצוי שגם החתכים של הגרגרים יהיו בעלי אותה צורת מצולע. במקרה כזה הרחוב של הגרגרים צריך להיות קטן במספר סדרי גודל מרוחב החתך של הסיב. אורך הגרגרים בעלי חתכים מצולעים יכול להיות גדול פי כמה מרוחבם. כלומר צפויים במקרה כזה גרגרים בצורות של מקלות שטוחים. אלה, כאמור, גרגרים עבור סיבים עם חתך מצולע. הם יוכלו להקשיח היטב את הסיב אם הם יהיו מסודרים כך שציר האורך שלהם יפנה בכיוון ציר האורך של הסיב וצפיפותם תהיה כזאת שתאפשר מילוי כל חתך הרחוב של הסיב. כך עשויה להתקבל מידת הקשחה מירבית כאשר למקלות השטוחים אין חופש תזוזה בכיוון הרחובי של הסיב. לעומת זאת, בסיב בעל חתך עגול רצוי כאמור, שהחתך של הגרגרים יהיה אף הוא עגול. גם כאן החתכים של הגרגרים צריך להיות קטנים בכמה סדרי גודל מרוחב הסיב. כידוע, אריזה של גופים בעלי חתכים עגולים תמיד תשאיר מרווחים ביניהם. לכן, כדי לקבל מידת הקשחה גבוהה דרושים גרגרים בעלי חתכים במידות קטנות בהרבה מאלו של הגרגרים המצולעים בסיב בעל הרחוב המצולע הנ"ל. בנוסף לכך, אם הרחוב של הגרגרים קטן בהרבה רצוי גם שאורכם יקטן בהרבה, אחרת הם ישברו. לכן, בסך הכל צפוי שגרגרים המיועדים לסיבים בעלי חתך עגול יהיו קטנים בהרבה מהגרגרים בעלי חתך מצולע. יחד עם זאת, עד כמה שהגרגרים העגולים יהיו קטנים - תמיד ישארו חללים ביניהם כאשר הם ימלאו את רוחב הסיב. לכן, סיב עגול הממולא בכל רחבו ע"י גרגרים עגולים צפוי להיות פחות קשיח מאשר סיב מצולע הממולא בכל רחבו בגרגרים בעלי אותה צורת חתך מצולעת. זאת, כמובן בהנחה שיתר התכונות של הסיבים והנוזלים בהם מצויות אבקות הגרגרים - זהות. אם גם בתכונות אלו יש הבדלים - ניתן לצפות להבדלים נוספים גם במידות ההקשחה. ניתן לדון גם בשאלה ממה עשוי כל גרגר אבקה בכל אחד משני הסוגים העיקריים הללו, דהיינו הסוג בעל החתך המצולע והסוג בעל החתך העגול. הראשון צפוי, כאמור להיות בצורת מקל קשיח. לכן הוא צפוי להיות סוג של גביש קשיח. גבישים קשיחים הם בדרך כלל שקופים (מחזירים אורכי גל בטווחים של אולטרה סגול רחוק). לכן ניתן לצפות שהגרגרים מהסוג הראשון יהיו בצורת מקלות שקופים. מאידך, מהגרגרים של הסוג השני, בעלי החתך העגול, אין לצפות שיהיו דווקא במבנה גבישי - שכן גביש נוטה לצורות מצולעות - אלא למבנה כדורי או סגלגלי של מולקולות בעלות קשרים פחות חזקים מאשר אצל גבישים. אי לזאת, ניתן לצפות שאבקות הגרגרים מהסוג הראשון תהיה בעלת צבע שחור. שכן קרני האור חודרות ונבלעות במעברן דרך הגבישים הרבים שאינם מסודרים בצורה מוגדרת אלא מגובבים אלה על אלה. לעומת זאת, האבקה של הסוג השני, בעל החתך העגול, עשויה להחזיר צבע פחות כהה, התלוי בצפיפות ובקוטר הגרגרים. יתכן שגם החומר הנוזלי המכיל את האבקה יהיה בעל צבע. במקרה כזה כל התערובת תקבל צבע מעורב. לכן הצבעים שיתקבלו בתוך הסיבים אמורים להיות בגוונים שחור עם או בלי שילוב של צבע נוסף.

אנו נראה להלן שבעור הזיקית - את תערובת האבקה והנוזל המלאכותיים שתכננו לעיל עשויים להחליף המלנין ואת המיכל הגמיש, עם שלוחות הסיבים היוצאים ממנו, עשוי להחליף תא המלנופור.

### 3. כרומטופורים ופיגמנטים בעורות של זוחלים

בפרק הקודם הבאתי, כפיסיקאי, תכנון אופציונלי למערכת רב שכבתית של רשתות בעלת תכונות פיסיקליות מיוחדות שנועדו לחקות במידה כלשהי את התכונות הפיסיקליות של עור הזיקית. העליתי שם מספר רעיונות לפתרונות הנדסיים הנראים לי כהגיוניים, אך עד לישומם בטכנולוגיה יעברו עוד שנים רבות. למעשה, לצורך פיתוח הרעיונות נעזרתי מדי פעם בתאורים ביולוגיים של עור הזיקית והתכונות המיוחדות של תאי הצבע המצויים בו. תאורים אלו נתנו לי כיוון חדש לפתרון כל אימת שנתקלתי בבעיה שלא יכולתי לפתור אותה באמצעות ההבנה הפיסיקלית-הנדסית שלי. אין בליבי ספק שהפתרון שהצעתי רחוק מרמת השלמות של הפתרון הטבעי. אולם עצם העובדה שהפתרונות של הטבע איפשרו העלאת רעיונות פיסיקליים-הנדסיים סבירים, כדוגמת אלו שהועלו בפרק הקודם, מצביעה על כך שגם העקרונות המנחים את הטבע מבוססים על שיקולים פיסיקליים-הנדסיים בסיסיים.

הזיקית שייכת למחלקת הזוחלים וכדי לדון בתכונות הפיסיקליות המיוחדות של עור הזיקית אביא ציטוטים נבחרים ממספר מקורות.

מעמ' 16-32 מהכרך החמישי של האנציקלופדיה "החי והצומח של ארץ ישראל" הדן בזוחלים ודוחיים [2]. הציטוטים יתייחסו בעיקר לעור הלטאות, המאפיין בכללותו גם את עור הזיקית:

"הזוחלים הם מחלקה של חולייתנים אקטותרמיים (הנעזרים בגורמים חיצוניים לקביעת חום גופם). גופם מכוסה קשקשים קרניים.

[...] **כיסוי הגוף:** תפקיד העור של הזוחלים הוא למנוע פגיעות מכאניות ואיבוד נוזלים לסביבה. לשם כך התפתח עור עבה שצדו החיצוני, הנקרא אפידרמיס, מורכב מתאים קרניים מתים וצפופים. השכבה הקרנית החיצונית עבה מזו של הדוחיים ומורכבת מרבדים צפופים של תאים מתים. התאים האלה דקים, שטוחים ועשויים בעיקר חלבון קרני - קרטין, ומכסים את כל שטח פני הגוף של הזוחל. השכבה החיצונית של האפידרמיס מוחלפת מפעם לפעם בתהליך הנקרא התנשלות.

[...] **הקשקשים:** עור הזוחלים (חוץ מעורם של מיני צבים אחדים) מאופיין בכסות הקשקשים שעליו. צורתם של הקשקשים רבגונית, מקשקשים גריסיים זעירים ועד ללוחות רחבים הנושאים מבנים קוצניים מורכבים. עם זאת סדורים הקשקשים תמיד בדגם מסוים ואופייני, המשמש כלי-עזר נוח להגדרה. אצל הקשקשאים שונים לרוב קשקשי הראש והגחון משאר הקשקשים.

[...] **הדרמיס:** שכבת עור פנימית זו תומכת ומזינה את האפידרמיס, והיא מפותחת מאד אצל הזוחלים. הדרמיס היא שכבה עבה של רקמת חיבור חיה. אצל זוחלים רבים קיימת נטיה לפתח שריון גרמי בתוך הדרמיס. [...] גם אצל הלטאות מוצאים לעיתים עצמות גרמיות זעירות השקועות בדרמיס. הן נקראות אוסטאודרמיס. לעיתים קרובות, אך לא תמיד, דומות עצמות אלה בגודלן ובצורתן לקשקשים האפידרמליים שמעליהן. **הבלוטות:** בעור הזוחלים אין כמעט בלוטות. כך נחסכת הרטבתו ונמנע אבדן מים מן הגוף.

[...] **יחסי טמפרטורה:** תהליך חילוף החומרים בגוף בעל-החיים יוצר חום. מאחר שהסעת החמצן לרקמות הזוחלים אינה יעילה כמו אצל עופות ויונקים, הרמה המטבולית של הזוחלים נמוכה יותר, וכדי להביא את גופם לדרגת חום המאפשרת פעילות תקינה, עליהם לספוג חום מהסביבה - אך להימנע מחימום-

יתר. לפיכך מכונים הזוחלים בעלי-חיים אקטותרמיים, כלומר מקור חימוםם הוא חיצוני. לזוחלים רבים יש טמפרטורת גוף מועדפת, שעליה הם שומרים בעת פעילותם באמצעות התנהגות מתאימה.

בעמ' 79-80 של [2] מתואר לגבי עורה של הזיקית בשם "הזיקית המובהקת" (Chamaeleo chamaeleon), הנקראת במקומות אחרים גם "הזיקית המצויה", כדלהלן:

" הזיקיתיים בני הסוג זיקית - Chamaeleo מותאמים לחיים אילניים (ארבוראליים) יותר משאר בני סדרת הלטאות. הגוף פחוס-צדדים בעוד אשר לשאר הלטאות לרוב גוף מעוגל או משוטח. אצל הזיקיות עשוי הגוף לשנות את צורתו, לעיתים הוא גבוה ושטוח כעלה ולעיתים נפוח ועגלגל - הכל בהתאם לכמות האויר הנשאפת אל שקי הריאות. [...] רוב רובה של הזיקית מכוסה קשקשים קטנים וגריסיים הצמודים לעור ואינם רעופים זה על זה."

ובאנציקלופדיה העברית [7], ערך "זקיות" יש תוספת חשובה מבחינתנו ולכן אצטט גם משם:

" הזיקיות הן שוכני עצים מובהקים. גופן פחוס ודק משני צדדיו, רובו מכוסה קשקשים גרגיריים קטנים, וביניהם **קיפולי עור** רך, מה שמאפשר לזיקיות **להתכווץ ולהתמתח בשעת הצורך - ביחוד במעברים הצרים בין הענפים.**"

על רקע תאורים אלה של עור הזוחלים, ובעיקר עור הזיקית, נעבור לדון בתכונות הפיסיקליות של הצבעים המצויים בעורות הזוחלים.

### 3.1. המלנופורים והמלנין

בעמ' 172 של [2], הדן בכרומוטופורים ופיגמנטים בעורות של זוחלים, מובא הקטע הבא בקשר לצבעי הזוחלים באופן כללי ולתאים המלנופוריים בפרט:

#### " כרומוטופורים ופיגמנטים "

צבעי הזוחלים נוצרים על ידי צרופים של מספר **צבענים (פיגמנטים)** ושל **צבעים פיסיקליים-סטרוקטורליים**. התאים האחראים לצבעוניות נקראים **כרומוטופורים** והם מצויים בעור **התחתון - הדרמיס**. ארבעה טיפוסים כרומוטופורים מצויים בעור הזוחלים. יש מיני זוחלים שבהם מופיעים כל ארבעת הטיפוסים, ובאחרים מופיע רק חלק מהם. גם פיזורם בעורו של כל זוחל אינו אחיד. יש שכולם מופיעים באיבר מסוים ויש שרק חלקם מצויים בו.

החשובים בין הכרומוטופורים הם **המלנופורים**, שקיבלו את שמם על שם הצבען מלנין המצוי בהם. צבע גרגרי המלנין **שחור** או **חום** והוא שכיח בקרב עולם החי. הוא המעניק לנוצות העורב את צבען השחור, הוא הגורם לשחרוריות שבין החיפושיות להיות שחורות, ואף פרוותו השחורה של החתול חבה את צבעה למלנין. המלנין, הנחשב לחומר מגן אוניברסלי בפני קרינה עתירת אנרגיה (קרניים אולטרה-סגולות), קובע גם את הצבעים של בני האדם. ריבוי מלנין בעור גורם לעור כהה, ומיעוטו - לעור בהיר; ריבוי מלנין בשיער גורם לשיער שחור ומיעוטו לשיער בלונדי; ריבוי מלנין בקשתית העין מקנה לה צבע שחור או חום ומעט מלנין מקנה לה צבע כחול או ירוק.

המלנופוריים מצויים עמוק בתוך הדרמיס. כל מלנופור בנוי גוף-תא מרכזי, וממנו יוצאות שלוחות רבות לכל הכיוונים. השלוחות חודרות אל בין התאים הפזורים בעור, ויוצרות סביבם מעין רשת צפופה. כאשר גרגרי המלנין פזורים בכל השלוחות – כהה עורו של הזוחל, וכאשר הם מתרכזים בגופי התאים – צבעו בהיר. מינים רבים של זוחלים (וגם דוחיים) מסוגלים לווסת את פיזור גרגרי המלנין במלנופורים ולשנות בדרך זו את צבעיהם. ויסות זה נעשה בעיקר בהשפעת הורמונים המופרשים מבלוטת יותרת-המוח (היפופיזה) ומבלוטת יותרת-הכליה (אדרנל). "

עד כאן ציטוט מעמ' 172 של [2]. התמונה בעמ' 18 של מקור זה [2] מראה את מיקומם של תאי הצבע בעורו של זוחל. השלוחות השחורות של תאי המלנופוריים בתמונה זאת נראות לי כעמודי חיזוק. גופי התאים המלנופוריים מצויים עמוק בתוך הדרמיס, מתחת לשכבות הרשתיות של הדרמיס הסמוכות לאפידרמיס. התפשטות המלנין בשלוחות התאים המלנופוריים נראית לי כפעולה הנועדת להגביר את קשיותן של אותן שכבות. יניקת המלנין מהשלוחות, חזרה אל גופי התאים המלנופוריים, נראית לי כהרפיית ההקשחה של אותן שכבות. ההסבר הביולוגי המופיע באותו עמ' 172 של [2], שלפיו פיזור המלנין בשלוחות גורם להסתרת הצבעים של הצבענים האחרים, מחזק את ההנחה שלי ששינויי הצבעים בעור הזיקית מהווה ביטוי לשינוי התכונות הפיסיקליות-הנדסיות של העור.

כאמור בתאור הביולוגי הנ"ל, תאים מלנופוריים מצויים בבעלי חיים רבים. כאשר חקרתי בעבר נושא הקשור לפיסיקה של "העין" בזנב הטווס נתקלתי במקורות רבים המצביעים על ההשפעה של תאים מלנופוריים על שינויים בתכונות הפיסיקליות של נוצות ציפורים, הנגרמים כתוצאה מהתפשטות מלנין בחלקים הסמוכים למעטפת החיצונית של הנוצה. למשל, מעמוד 393 של המדריך של Lucas [3] נוכחים שהמלנין מגביר את הצפיפות של הנוצה ואת התנגדותה לשחיקה ולשינויים פוטוכימיים. תכונות אלו שהיו ידועות באופן גס מתחילת המאה ה-20 - קיבלו אישור בבדיקות בעזרת מיקרוסקופ אלקטרוני, אשר הראו שחלקיקי המלנין, המסודרים בצורת שורות מוארכות, תורמים רבות לעיבוי (bulk) ולחוזק של הנוצות. בשל חשיבות הנושא לעניינינו אביא כאן ציטוט מאותו עמ' 393 של [3]:

Melanin also has the effect of making the feather denser and more resistant to wear and photochemical changes. This occurs particularly in places where concentrations of eumelanins are dense. ... This property of melanin has long been known from gross observations (Spottel, 1914) and has recently been supported in studies with an electron microscope. From his observation, Car (1957: 161) gained the impression ... "that the particles, arranged in lengthwise rows, contributed quite notably to the bulk and strength of the feathers".

כלומר, לתאים המלנופוריים בציפורים יש אכן השפעה על שינוי התכונות הפיסיקליות של הנוצה בכיוון של חיזוק הנוצה באיזור שבו מצוייה צפיפות גדולה של תאי מלנין. אם השינוי הפיסיקלי הזה קורה במעטפות החיצוניות אצל ציפורים, סביר להניח ששינויים דומים, בכיוון של חיזוק פיסיקלי של האזור המלונן (בעל צפיפות גדולה של מלנין), קורה גם בעור הזיקית. אלא שאצל הזיקית קיימת האפשרות לשינויים מהירים, לעיתים במשך שניות, של צפיפות המלנין בכל אזור - דבר הלוקח אצל ציפורים פרקי זמן ארוכים, ולעיתים אפילו שנים. עד כאן לגבי החשיבות הפיסיקלית של השלוחות עצמן של התאים המלנופוריים.

דברים אלה מחזקים את ההנחה הראשונית שלי ששלוחות התאים המלנופוריים בעור הזיקית משמשים לחיזוק, כדוגמת הסיבים המלאכותיים הארוכים שנועדו לתרום לחיזוק של מערכת הרשתות הרב שכבתית שבפרק הקודם. עד כאן לגבי השלוחות עצמן המקבילים לסיבים המלאכותיים. אך מה לגבי אופיים של החומרים האמורים לזרום בתוך אותם סיבים ארוכים. כפי שראינו בתאור הביולוגי, בתאים המלנופוריים משמשים סוגים שונים של מלנין כחומרים הזורמים מגוף התא אל השלוחות ולהיפך. בעמ' 23 בספרו של Voitkevich [4] מצאתי הסבר על מהותם של החלקיקים המרכיבים את המלנין. מדובר בשני סוגים קרובים של מלנין, יומלנין ופאומלנין, שהם

תולדות של אותו חומר. גרגרי יומלנין הם בצורת מקלות באורך של 0.5 עד 1.5 מיקרון וכאשר הם מצויים בכמות גדולה מתקבל צבע שחור. גרגרי פאומלנין הם בצורה כדורית או סגלגלה, כמו ביצה (ovoid), קטנים מגרגרי יומלנין ונותנים צבעים המשתנים מצבע חום חלודה (rusty brown) לצהוב חיוור כאשר הגרגרים קטנים יותר. בתהליך יצור סינטטי של מלנין נוצרים תחילה גרגרים צהובים קטנים ההולכים וגדלים, ובמקביל לכך הם משנים את צבעם לחום כהה או שחור. כדי שלא לעוות את המינוחים המדעיים, אותם תרגמתי כאן באופן חופשי, אביא להלן ציטוט מדויק של התאור הזה בעמ' 23 של [4]:

Melanin within the feather occurs in two closely related forms, as eumelanin and phaeomelanin, two variants of the same propigment. Both types of melanin develop always as granules, in the cytoplasm of special pigment cells, the melanophores, and may occur in all structural elements of the feather. Eumelanin granules are usually rod-shaped (0.5-1.2 micron) and when present in large quantities produce a dark colour. Phaeomelanin occurs in the shape of spheroid or ovoid granules of smaller size than those of eumelanin, and produce a colouring which varies from rusty brown to pale yellow when the granules are smallest. Dorris (1938) has shown that the process of melanin synthesis begins with the formation of small yellow granules, which become larger and simultaneously dark brown or black. This author assumes that the intensity of the colour depends on the stage at which oxidation of tyrosin ends.

כלומר, מדובר בשני סוגים של מלנין האחד מורכב מגרגרים בצורת מקלות זעירים שקופים, אשר בהיותם בכמויות גדולות בתאים המיוחדים הם בולעים את כל אורכי הגל ונותנים צבע שחור, ומלנין מסוג שני המורכב מגרגרים כדוריים או סגלגלים הנותנים צבעים התלויים בגודלם של הגרגרים, דהינו מצהוב חיוור עד חום כהה ושחור. ככל שהגרגרים הסגלגלים גדולים יותר כן צבעם כהה יותר. שינוי הצבע הזה מצביע, לדעתי, על כך שאותם גרגרים סגלגליים נוצרים אולי כתוצאה מהתקרבות של מולקולות ארוכות – כדוגמת חוטי צמר ארוכים המתקרבלים לכדור. זה עשוי להתיישב עם העובדה הידועה שמלנין הוא פולימר, דהינו מולקולת ענק המורכבת ממספר רב של מולקולות זהות ופשוטות יחסית (ראה למשל בלקסיקון דביר לביולוגיה). סביר לדעתי שככל שההתקרבות הולכת וגדלה כן יש בליעה גדולה יותר של קרני האור והצבע המוחזר מתכהה.

תאורים ביולוגיים אלה של שני סוגי המלנין תואמים לדעתי את הצרכים הפיסיקליים-הנדסיים שתוארו בפרק הקודם עבור שני סוגי אבקות הגרגרים האמורים לזרום בסיבים המחוברים למיכלים המיועדים לחיזוק המערכת הרשתית הרב שכבתית. כאמור, ההתאמה הזאת אינה מקרית, שכן אני כפיסיקאי למדתי פרק חשוב בשיטות חיזוק של רשתות רב שכבתיות על סמך הסתכלות על התאים המלנופוריים הביולוגיים. עד כמה הצלחתי להתקרב לפתרונות של הטבע יתברר בעתיד. אולם כבר עתה לא ניתן להתעלם מהאפשרות שהתאים המלנופוריים, בעלי השלוחות והמיכלים גרגרי מלנין משני הסוגים המוזכרים כאן, מהווים מערכת חיזוקים, הניתנת לשליטה בעוצמות החוזק, בכל אזור של עור הזוחל. בעיקר חשוב הדבר עבור הזיקית, אשר לגביה קיימים מעברים תכופים בין סביבות הדורשות גמישות מירבית של העור לסביבות הדורשות קשיחות מרובה שלו.

בפרק הקודם דיברנו על מערכת רשתות רב שכבתית מלאכותית, כדוגמת מספר דפי טישו, אשר נעזרת במיכלי החומרים המתפשטים לשלוחות המחוברות למיכלים כדי לחזק את המערכת הרב שכבתית בעת הצורך. עשינו את ההשוואה בין המערכת המלאכותית לבין מערכת אורגנית והראנו שהתאים המלנופוריים, על שלוחותיהם, עשויים לשמש לצורכי חיזוק המערכת הרב שכבתית האורגנית בעת הצורך. אולם יש היבט המיוחד לרשתות אורגניות ושאינו מודגש דיו במערכת המלאכותית שלנו. במערכת אורגנית עשויים גורמים חיצוניים לרופף את המערכת. למשל, חום רב מידי עשוי לגרום להתרחבות התאים האורגניים ולהחלשה רבה של המערכת כולה. גם לחץ חזק מידי או מתיחה חזקה מידי של הרשת האורגנית (העור למשל) עשויים להחליש מאד את הרשת כולה. במקרים כאלה חשוב לחזק את המערכת האורגנית בכל דרך אפשרית ובמהירות לפני שיגרם נזק בלתי הפיך. התפשטות המלנין בשלוחות התאים המלנופוריים מחזקת את הרשת הרב שכבתית האורגנית מייד. לכן אין להתפלא לדעתי על כך שהזיקית מתכהה כאשר היא מצויה בחום רב מדי או

כאשר נוגעים בה או עומדים לגעת בה. התגובה הנכונה הראשונה של כל מי שרוצה לשרוד הוא לחזק את האזורים המאוימים. המגן אצל האבירים בימי הביניים שימש כחיזוק למערכות הגוף המאוימות על ידי החרב של האויב. התפשטות התאים המלנופוריים אצל הזיקית משמש כמגן בפני השיניים או הציפורניים של בעלי החיים המנסים לתקוף אותה. ניפוח הגוף מהווה אמצעי נוסף לחיזוק העור. לכן, כל ההתנהגויות הנראות מוזרות אצל הזיקית אינן אלא אמצעי הגנה שונים, אשר לו אנו היינו בעלי אותן תכונות עור כמו של הזיקית היינו מבינים אותם ללא קושי.

לאחר שנכחנו ביתרונות הפיסיקליים-הנדסיים של התאים המלנופוריים ניתן לצפות שגם לתאים הכרומוטופוריים האחרים יש תפקידים פיסיקליים-הנדסיים מוגדרים. כזכור, בעור הזיקית מצויים, בנוסף לתאים המלנופוריים, גם תאים קסנתופורים, האחראים לצבע הצהוב של העור, וגם תאים גואנופורים האחראים לצבע הכחול בעור הזיקית. בסעיפים הבאים נדון בהיבטים הביולוגיים של שני סוגי תאים אלה.

### 3.2 תאי הצבע הקסנתופורים

בעמ' 172 ב-[2], בהמשך הקטע שצוטט לעיל בקשר לתאים המלנופורים, מובא תאור התאים הקסנתופורים בעור הזוחלים:

**"תאי הצבע מהסוג השני נקראים קסנתופורים או ליפופורים. אלה הם תאים קטנים וחסרי שלוחות שצורתם סגלגלה, והם פזורים בעור מעל למלנופורים, סמוך לאפידרמיס. הם מכילים חומרים שומניים – פטרידינים וקרוטנואידים היוצרים את הצבען של הקסנתופורים. צבען זה מחזיר לרוב צבע צהוב ולעיתים צבע צהוב-ירקרק. שלוחות המלנופורים חודרות אל בין הקסנתופורים. כאשר המלנין מפוזר בהם, נוצר מיסוך על הצבע הצהוב, והזוחל נראה כהה, אך כאשר המלנין מרוכז בגופי התאים מתבלט צבעם הצהבהב של הקסנתופורים."**

בעקבות תאור זה עלה על דעתי שתאי הצבע הקסנתופורים משמשים לצורך סיכה למניעת החיכוך בין השכבות האורגניות בעור הזיקית הסמוכות לאפידרמיס. העובדה שהקסנתופורים מחזירים בעיקרו צבע צהוב או צהוב-ירקרק מתיישבת יפה עם הכרותנו את הצבעים של סוגי שמנים רבים. התבוננתי בסופרמרקט במדף בקבוקי השמן ונוכחתי שמרבית סוגי השמנים הרגילים שם היו בגוונים שונים של צהוב, בעוד שבקבוקי שמן הזית היו בגוונים של צהוב-ירקרק. לשמן כידוע יש תכונות פיסיקליות רבות. מבחינה מכנית הוא עוזר במניעת חיכוך. מבחינה חומנית הוא שומר חום מעולה. לא מן הנמנע לכן שהתאים הקסנתופורים בעור בעלי חיים רבים, משמשים הן לשמירת חום – מעין מחסן חום זמין לזמנים קרים כמו אצל דובי הקוטב - והן למניעת חיכוך בין השכבות האורגניות בעת שהן נעות אחת ביחס לרעותה הסמוכה עקב התנועות השונות של בעל החיים.

אולם, אחת הבעיות הידועות של חומרים שומניים היא שהם נמסים בחום רב מידי. לכל חומר שומני קיימת דרגת החום שמעבר לה הוא נמס. כך גם לגבי החומרים השומניים המוכלים בתאים הקסנתופורים. אם החומרים בתאים אלה יתמוססו תפגע תכונתם המכנית בהקטנת החיכוך וגם החום שנצבר בהם יתפזר ולא יהיה זמין לתקופה קרה. לכן, חשוב לדעתי שיתפתח מנגנון אשר ימנע את התחממות היתר של החומרים השומניים בתאים הקסנתופורים. כל בעל חיים מפתח מנגנון משלו. בני האדם לובשים בגדים מבודדים או נכנסים לחדר ממוזג (או מערה קרירה בימי קדם). בעלי חיים רבים יתחמקו מהשמש הלוהטת למקום מוצל או לחפירה תת קרקעית. אולם, הזיקית צריכה, כזכור, להמתין ללא תנועה זמנים ארוכים על ענפי העץ כדי ללכוד את טרפה כאשר זה ינחת בסמוך אליה וילכד בעזרת לשונה הארוכה והדביקה. לכן על הזיקית לפתח מנגנון שיבודד את התאים הקסנתופורים מהחום גם כאשר היא שוהה בשמש ביום חם. איזה פתרון יותר אידיאלי מאשר לכסות את התאים הללו בחומר מבודד מחום. ומה יותר מבודד מחום מאשר מלנין שחור - הבולע את

הקרניים הכחולות והאולטרה סגולות רבות האנרגיה של קרני השמש ואינו מעביר אותן פנימה. אינו מתפלא לכן ששלוחות התאים המלנופורים - המכילים כזכור מלנין - מצויות בעור הזיקית וזוחלים אחרים מעל התאים הקסנתופורים. אין להתפלא גם שצבע העור של הזיקית מתכהה כאשר היא מצויה במקום חם או תחת שמש יוקדת. כפי שראינו לעיל, המלנין בתאים המלנופורים מתפשט אל השלוחות שלהם בחום רב או בחשיפה ארוכה מדי לשמש. התפשטות זאת מגינה כנראה על התאים הקסנתופורים בפני עודף חום. זאת בנוסף להגנה בפני החלשות המערכת האורגנית, כפי שראינו בסעיף הקודם.

יש מקום לשאול מדוע התאים הקסנתופורים הם (א) חסרי שלוחות, (ב) סגלגלים (ו-ג) קטנים, כמצוטט לעיל. התשובה לשאלה א', בנוגע לחוסר בשלוחות, פשוטה להסבר: אם התאים הקסנתופורים נועדו למנוע חיכוך בין שכבות של רשתות אורגניות סמוכות - משמע ששתי השכבות אמורות לנוע אופקית האחת ביחס לרעותה. קיומה של שלוחה, המחוברת לגוף תא קסנתופורי היושב בין השכבות, תקשה על התנועה היחסית הזאת. אם השלוחה תהינה מסורגת בין הרשתות תיווצר התנגדות לתזוזה יחסית אופקית, כפי שבורג המחבר שתי רשתות מתכת יקשה על תזוזה אופקית ביניהן. אם השלוחה תהיה פרושה שתי הרשתות הרי כל תנועה אופקית יחסית בין הרשתות תגולל את השלוחה והדבר יקשה על התנועה ביניהן. בכך יגדל החיכוך במקום לקטון. כלומר, תתקבל תוצאה הפוכה למטרת קיומו (לדעתי) של התא הקסנתופורי. כתשובה לשאלה ב', לגבי הצורה הסגלגלה דווקא ולא צורה כדורית: צורה סגלגלה מאפשרת גלגול בכיוון אחד ומונעת גלגול בכיוון הניצב לו. למשל ביצה מוארכת (סגלגלה) תתגלגל בקלות סביב הציר האורכי שלה אך לא סביב הציר הרחבי שלה. קיומם של תאים קסנתופורים סגלגלים מצביע להערכתי על כך כי באזור המצאו של כל תא יש העדפה לתנועה יחסית בכיוון אופקי מוגדר של השכבות - שביניהן מצוי התא הקסנתופורי - והגבלה על תנועה יחסית בכיוון אופקי הניצב לכיוון המוגדר. כדי לנסות לתת תשובה תשובה לשאלה ג', מדוע התאים הקסנתופורים קטנים, יש להבין את מהותו של החומר המוכל בתא הקסנתופורי. על פי המצוטט לעיל מעמ' 172 במקור [2] התאים הקסנתופורים מכילים חומרים שומניים - פטרידינים וקרוטנואידים היוצרים את הצבען של הקסנתופורים. מעמ' 400 של Lucas [3] אנו למדים שהקרוטנואידים אינם נוצרים בגופם של הציפורים אלא מתקבלים מהצומח, לעיתים עם שינויים קלים. אני מניח שכך גם לגבי זוחלים. לכן יש מקום לבדוק את ההרכב של הקרוטנואידים בצומח. על פי ספר הלימוד "הפיסיולוגיה של הצמח" [5], הקרוטנואידים (Carotenoids) מתחלקים לשתי קבוצות עיקריות: קרוטנים (Carotenes) וקסנתופילים (Xanthophylls). כפי שמצוטט מעמ' 149 במקור זה:

"מבחינה כימית שייכים הקרוטנואידים לקבוצת הטרפנים. יחידת היסוד במבנם היא יחידת האיזופרן. הם מכילים שרשראות של כארבעים פחמנים ומספר רב של קשרים כפולים צמודים. לעיתים קשורות בקצות השרשרת טבעות ציקלוהקסניליות. הקסנתופילים נבדלים מהקרוטנים בכך שהם מכילים במולקולה שלהם חמצן בצורת קבוצת OH. נוסחות-מבנה של קרוטנים שונים מובאות בתמונה 10.10. הקרוטנואידים הם חומרים פעילים מבחינה כימית הודות לריבוי הקשרים הכפולים, ומתחמצנים בקלות על-ידי חמצן מולקולרי. בהוספת חומצה גפריתית מרוכזת הם נותנים צבע כחול כהה. כל הקרוטנואידים בולעים אור באזור הסגול-כחול של הספקטרום ובאולטרה סגול. בדומה לכלורופילים משתנים גם כאן במקצת קוי הבליעה האפייניים בסולבנטים שונים."

תמונה 10.10 בעמ' 149 של מקור [5] זה מראה את נוסחות המבנה של 4 סוגי קרוטנואידים: לותאין, קרוטן ביתא, קרוטן דלתא וליקופן. בכל המבנים רואים שרשרת ארוכה זהה של 22 פחמנים המחברים למימנים בקשרים בודדים או כפולים, כאשר בשני קצות השרשרת טבעות משושות. ההבדלים בין ארבעת הסוגים הללו מתבטאים במיקום ובמספר הקשרים הכפולים בתוך הטבעות. במבנה של לותאין, מתווספת לכל אחת משתי הטבעות מולקולת OH.

דומני שמבנה השרשרת הלא ארוכה הזאת, בהשוואה לפולימר הארוך בו נתקלנו לעיל בקשר למלנין, עשוי להסביר את קטנותם של תאי הקסנתופורים. בדיון לעיל על פאומלין הוסבר לגביו שכל

עוד ההתכרבלות קטנה מתקבל צבע צהוב חיוור. לכן, אני מניח שכאן אצל הקסנתופיל קיימת התכרבלות קטנה של השרשרת בת עשרות הפחמנים. הקסנתופיל בולע, כאמור, את הקצה עתיר האנרגיה שבספקטרום, דהינו את הסגול-כחול והאולטרה סגול. לכן מתקבל הצבע הצהוב (שהוא שילוב של ירוק ואדום). שימור החום ע"י הקסנתופיל הצהוב נוצר, למיטב הבנתי כפיסיקאי (ולא כביולוג), מבליעת הקרניים עתירות האנרגיה (עם אופציה להפיכתם לחום מאוחר יותר בתהליך פנימי כלשהו) ומההתחברות של חמצן אל מולקולות OH (??).

שאלה נוספת שברצוני לענות עליה כאן היא סיבת מיקומם המיוחד של התאים הקסנתופורים. כפי שצוטט לעיל, התאים הקסנתופורים מצויים בסמוך לאפידרמיס. כלומר הם מצויים בשכבות העליונות של הדרמיס. ניתן להבין זאת כאשר שמים לב למבנה המיוחד של עור הזיקית, אשר בו האפידרמיס מורכב מגרגרים קשקשיים קרניים, כלומר בעל נוקשות נקודתית, ושכבות הדרמיס אמורות לעבור בהדרגה ממצב של שכבה אורגנית חיה באופן מלא, בתחתית הדרמיס, למצב בעל הנוקשות הנקודתית. לכן השכבות הסמוכות לאפידרמיס נוקשות יותר מאלה שתחתיהן וקיימת ביניהן רמה גבוהה יותר של חיכוך בעקבות כיפוף או תנועה אחרת של העור. לכן הצורך בתאי סיכה בשכבות עליונות אלו דווקא, כלומר בתאים הקסנתופורים. גם מהבחינה של שימור חום על ידי התאים הקסנתופורים, יש חשיבות להמצאותם קרוב ככל הניתן לאפידרמיס המתחמם בשמש ו/או בחומו של הענף עליו יושבת הזיקית.

דומני שבכך קיבלנו תשובות מספקות, בשלב זה, לגבי המטרות שלשמן מצויים התאים הקסנתופורים בעור הזיקית. נוכחנו שהמטרות הן מניעת חיכוך בין השכבות האורגניות הסמוכות לאפידרמיס ושמירת חום. נעבור עתה לתאי הצבע הגואנופורים האחראים לצבע הכחול, אשר בעוברו דרך הצבענים הצהובים של תאי הקסנתופורים מתקבל צבע ירוק.

### 3.3 תאי הצבע האריתרופורים

בעמ' 172 בכרך החמישי של האנציקלופדיה "החי והצומח של ארץ ישראל" [2] מתוארים תאי צבע אריתרופורים (Erythrophores) המצויים בעורם של זוחלים כדלהלן:

" תאי הצבע מן הסוג השלישי הם האריתרופורים הנקראים גם אלופורים. גם אלה תאים קטנים וסגלגלים שאין להם שלוחות, הפזורים סמוך לאפידרמיס. בעורם של זוחלים הנושאים אריתרופורים וקסנתופורים ממוקמים הראשונים מתחת לאחרונים, עמוק יותר בעור. הפיגמנט המצוי באריתרופורים מחזיר אור אדום. שלוחות המלנופורים פזורות גם בין האריתרופורים. כאשר המלנין מצוי בשלוחות הוא מעלים את הצבע האדום, ורק כאשר המלנין מתרכז בגופי התאים מתבלט צבעם האדום של האריתרופורים".

לאור הנאמר בסעיף 2.1 לעיל, ועל סמך מכלול שיקולים שיובאו בהמשך, יתכן שבעורם של זוחלים מסוימים (לאו דווקא בזיקית) משמשים תאי האריתרופורים בתור תאים המכילים רצועות רב שכבתיות העוזרות לקיום האלסטיות למתיחה, כיווץ וכיפוף של שכבות העור הסמוכות לאפידרמיס. קיומם של תאי אריתרופורים אדומים אצל בעלי חיים רבים, וקיומם של צבעני אריתרין אדומים בצמחים שונים (כגון אצות וחזזיות מסוימות) עשוי להצביע על כך שגם שם הם משמשים כגורמים המאפשרים את האלסטיות למתיחה, כיווץ וכיפוף של הרקמות האורגניות בהן הם מצויים.

ניתן להביא דוגמאות רבות לרקמות אורגניות בעלות תוספות של צבע אדום אשר בהם נדרשת אלסטיות למתיחה, כיווץ וכיפוף. דומני שהדוגמה הבולטת ביותר היא זאת של כדוריות הדם האדומות. עד כמה שאני מבין, הן מגלות רמה גבוהה של אלסטיות למתיחה, כיווץ וכיפוף. אמנם לא חקרתי עדיין לעומק את הכדוריות האדומות אך דומני שלא אטעה אם אניח שכאשר הכדורית האדומה מתחברת עם חמצן ונעה אתו בעורקים המפותלים היא משנה את ממדיה ו/או את צורתה.



אם זה כך אזי יש בכך כדי להסביר את הצורך ברמה גבוהה של אלסטיות למתיחה, כיווץ וכיפוף. ממה שקראתי באנציקלופדיה העברית, בערך "דם", הכדורית האדומה משנה את ממדיה בהתאם לסוג התמיסה בו היא מצויה. דוגמה בולטת נוספת הם השרירים. רבים מהשרירים הם בעלי גוון אדום או אדום כהה. כידוע אחת התכונות החשובות ביותר של השרירים היא כושרם להתכווץ. קיימים שרירים הנקראים "משורטטים" אשר בהם יש פסים כהים יותר ופסים פחות כהים (ראה באנציקלופדיה העברית בערך "שרירים"). בין השרירים המשורטטים הללו מצויים שרירי השלד ושרירי הלב. בהם דרושה מידה רבה ביותר של אלסטיות למתיחה, ו/או כיווץ ו/או כיפוף. הפסים הכהים מצביעים לדעתי על מידה רבה יותר של אלסטיות. כיווני הפסים אמורים לדעתי להיות בהתאם לכיוונים הדרושים לאלסטיות גבוהה.

כמצוטט לעיל, שלוחות המלנופורים פזורות בין האריתרופורים כך שכאשר יש מלינין בשלוחות מוסתר הצבע האדום. הדבר מלמד שהתאים האריתרופורים זקוקים לשתי ההגנות של המלנופורים: הגנה מכנית – לחיזוק סביבתם כדי שהתאים הרגישים לא ינזקו עקב כוחות חיצוניים, ובידוד בפני חום כדי שהתאים האריתרופורים ותכולתם לא יהרסו עקב חום רב מדי.

מיקומם של התאים האריתרופורים בדרמיס של זוחלים רבים (לאו דוקא הזיקית) הוא מתחת לתאים הקסנתופורים. הדבר מלמד לדעתי שתאים אלה רגישים יותר לשינויים מכניים וחומניים, ושהגוף יזדקק ליותר משאבים נדירים כדי לייצר את התאים האריתרופורים מאשר יצור התאים השומניים הקסנתופורים.

ראוי לציין כי לא מוזכר במקום כלשהו שבדרמיס של הזיקית קיימים תאים אריתרופורים. לכן, אני מניח שבניגוד לזוחלים אחרים – אין בדרמיס של הזיקית תאים כאלה. מה הסיבה לכך. מהציטוטים שלעיל מתברר שבעור הזיקית קיים מנגנון מכני מיוחד למתיחה וכיווץ של העור: העור מכוסה ברובו קשקשים גרגיריים קטנים, וביניהם **קיפולי עור רך**, מה שמאפשר לזיקיות **להתמתח בשעת הצורך** בשעת המעברים הצרים בין הענפים. כאמור, גופה בדרך כלל פחוס וצר בצדדיו. אך יש ביכולתה להתנפח מאד, למשל כאשר מרגיזים אותה, על ידי שאיפת אוויר רב לריאותיה המצויות לאורך גופה. כלומר יש בעורה של הזיקית מנגנון המסוגל למתוח אותו ואולי אפילו להכפיל את שטחו. מידה כזאת של מתיחה היא מעבר למה שאני הייתי מצפה שיושג בעזרתם של התאים האריתרופורים. לכן אין לזיקית צורך בתאים מיוחדים שיאפשרו אלסטיות במתיחה, כיווץ וכיפוף. אי **לכך מיותרים התאים האריתרופורים בעור הזיקית**.

אני רואה בהסבר אחרון זה חיזוק נוסף להנחתי שהתאים האריתרופורים האדומים משמשים כמנגנון לשמירת האלסטיות למתיחה, כיווץ וכיפוף בחי ובצומח. הסיבה שגם בצומח נובעת מהעובדה המצוינת במקומות רבים, שבעלי החיים אינם מייצרים בדרך כלל את הפיגמנטים בגופם אלא קולטים אותם מהצומח ומשתמשים בהם, בדרך כלל ללא שינויים משמעותיים.

#### 3.4 תאי הצבע הגואנופורים

בעמ' 172 ב-2] מובאים הדברים הבאים הנוגעים לתאי הצבע הגואנופורים בעור הזוחלים, כאשר אדגיש את הדברים המרמזים לי על תפקידם הפיסיקלי של תאים אלה:

"תאי הצבע מן הטיפוס הרביעי הם **הגואנופורים**, המכונים גם לויקופורים, או אירידופורים. גם אלה הם **תאים קטנים וסגלגלים שאין להם שלוחות**, הם פזורים בעור מתחת לקסנתופורים ולאריתרופורים ומעל שכבת המלנופורים. **הגואנופורים אינם מכילים צבען כלשהו** (וזוה גם מקור השם לויקופורים, לויקוס – פירושו לבן ביונית). תחת זאת מצויים בהם **גבישים של החומר החלבוני גואנין, שצבעם לבן או שקוף**. גבישי הגואנין פועלים כמנסרות

ומפצלים את קרני האור הפוגעות בהן לשני רכיבים ראשיים: **אדום וכחול**. הרכיב האדום נבלע ברובו על ידי המלנין שמתחת לגואנופורים והרכיב הכחול מוחזר כלפי חוץ. זהו למעשה צבע פיסיקלי הנוצר על ידי גבישי הגואנין. גם הצבע הכחול של נוצות השלדג, צבע הקשקשים הכחולים של הקרבנון ההדור (דג הקרב הסיאמי) וצבעי הכחול העזים של פרפרי המורפו השוכנים בג'ונגל הברזילאי – הם צבעים פיסיקליים-סטרוקטורליים הנוצרים באורח דומה. **שלוחות המלנופורים פזורות בין הגואנופורים, וכאשר מצויים בהם גרגרי מלנין חל מיסוך והגואנופורים אינם מחזירים כל צבע; כאשר המלנין מרוכז בגופי התאים של המלנופורים מחזירים הגואנופורים אור כמעט לבן, וצבע העור של הזוחל הוא בהיר; אולם כאשר המלנין מפוזר בשלוחות המלנופורים פיזור חלקי – חלה בליעה טובה של רכיב האור האדום, והגואנופורים מחזירים צבע פיסיקלי כחול.**"

עד כאן התאור של תאי הגואנופורים ב-[2]. למקרא דברים אלה עלתה בי תמיהה מסוימת. הרי ידוע שצבע שחור בולע הן את הכחול והן את האדום. מדוע אם כן נאמר כאן **שהרכיב האדום נבלע ברובו על ידי המלנין (השחור) שמתחת לגואנופורים והרכיב הכחול מוחזר כלפי חוץ**. יתרה מכך בהמשך הציטוט נאמר שכאשר שלוחות המלנופורים ריקות ממלנין (כלומר כאשר המלנין מרוכז בגופי התאים המלנופורים), מחזירים גבישי הגואנופורים צבע לבן ואילו כאשר המלנין מפוזר **פיזור חלקי** חלה בליעה טובה של הרכיב האדום (דווקא) בעוד הרכיב הכחול מוחזר. הדעת נותנת שהתאור העובדתי, אשר ניתן לבחון אותו בהתבוננות, אמנם נכון. דהינו שכאשר המלנין מפוזר באופן חלקי מוחזר צבע כחול. אך איני בטוח שהפירוש הניתן בציטוט להעלמות האדום מדויק. לדעתי סביר יותר להניח שיש אזורים דרישה לתכונה פיסיקלית מסוימת (עליה נדבר בהמשך) בכיוון אחד ובאזורים סמוכים להם יש דרישה לאותה תכונה פיסיקלית אך בכיוון אחר. יש להניח שלצורך קיום אותה תכונה הפיסיקלית, על ידי התאים הגואנופורים, יהיו המנסרות של גבישי הגואנין מסודרות בצורה שונה בכל אחד משני סוגי האזורים, כך שבאזור האחד מוחזר לעיני הצופה בעיקר הצבע האדום ובאזור האחר מוחזר בעיקר הצבע הכחול. אם האזורים השונים הללו מצויים בסמיכות רבה לאזורים של הסוג השני, למשל אם הם מתחלפים לסרוגין, הרי שכאשר לא מצוי מלנין בשלוחות מוחזרים כל הצבעים ומתקבל לבן. וכאשר מפוזר מלנין בשלוחות שבאזורים אשר בהם המנסרות מחזירות אדום, נבלע הצבע האדום ומופיע לעיני הצופה צבע כחול. לעומת זאת כאשר המלנין מפוזר בכל סוגי האזורים נבלעים גם האדום וגם הכחול ומתקבל בעור הזוחל צבע שחור או כהה.

ומהו גואנין? כפי שמוגדר בלקסיקון [6]:

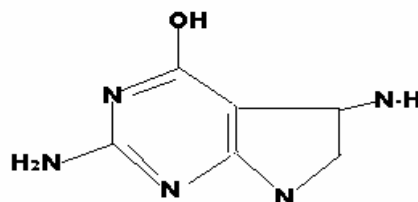
"גואנין (Guanine) הוא בסיס פוריני, מרכיב של חומצות גרעין, אחד מארבעת הבסיסים המרכיבים נוקלאוטידים של חומצות גרעין. חומר מטבולי של בעלי חיים."

"בסיס (Base) הוא תרכובת המשחררת יוני הידרוקסיל ( $\text{OH}^-$ ) בתמיסה מימית."

"פורין (Purine) הוא בסיס אורגני דו טבעתי. תרכובת הטרופיקלית הבנויה מטבעת משושה הצמודה לטבעת מחומשת."

הנוסחה הכימית של גואנין היא:  $\text{C}_5\text{H}_6\text{N}_5\text{O}$  והמבנה שלה הוא:

גואנין



כאן אנו רואים שרטוט **מישורי** של מולקולת הגואנין. כידוע, מולקולות פוריניות הן מישוריות, כפי שהתברר מבדיקות בקרני X (ראה למשל אנציקלופדיה עברית ערך "פורינים"). למרות זאת, כאשר התבוננתי במודל תלת ממדי של הסליל הכפול של DNA (במכון ויצמן למדע ברחובות) נוכחתי ששני הפורינים, גואנין ואדנין, מפותלים. כידוע הגואנין מופיע כאחד מארבעת הבסיסים המרכיבים את שלבי הסולם של ה-DNA כאשר עמודי הסולם מורכבים מסוכרים וזרחות. מבנה האדנין דומה למבנה הגואנין אך ללא המולקולה ההידרוכסילית OH. מהמודל התלת ממדי של ה-DNA ברור שיש לפתל את הטבעת המחומשת של הגואנין או האדנין, ביחס לטבעת המשושה, כדי להתאים אותם לסליל הכפול המפותל. כלומר, הגואנין והאדנין אמנם מישוריים, כאשר הם חופשיים, אולם הם **אלסטיים לפיתול**, כלומר הם מחזירים את המצב לקדמותו לאחר הרפיית הכוח המפתל. (אחרת הם היו נשארים מפותלים ולא היו מתיחסים אל פורינים אלה כאל מישוריים). עובדה זאת העלתה בי את המחשבה שתפקידם העיקרי של הגואנין והאדנין הוא בכושרם להעניק דרגות שונות של התכונה הפיסיקלית **אלסטיות לפיתול**, עבור הקטעים בסליל הכפול אליהם הם מחוברים. על האפשרות המעניינת הזאת מבחינת הבנת ה-DNA אעמוד במאמר אחר. כאן חשוב היה להדגיש שקיימת אפשרות שגבישי הגואנין, המצויים בתאים הגואנופורים, משמשים את המערכת האורגנית הרב שכבתית של עור הזיקית, לצורך קיום התכונה הפיסיקלית החשובה **אלסטיות בפיתול**.

האפשרות שגבישי הגואנין אלסטיים לפיתול מקבלת חיזוק גם מהעובדה שהם מסודרים בצורת מנסרות, כפי שמתבקש ממערכת המאפשרת אלסטיות בפיתול – עליה עמדנו בפרק הקודם. יחד עם זאת חשוב לשים לב שצריך להיות הבדל מהותי בין המנסרה מזכוכית המוכרת לנו, לבין המנסרה של גבישי הגואנין. מנסרת הזכוכית מפצלת את האור לכל גווני הקשת – ולא רק לקצוותיה אדום וכחול. אולם בציטוט שהבאנו לעיל מודגש שגבישי הגואנין מחזירים שני רכיבים בלבד: אדום וכחול. מה מקור ההבדלים הללו בין שני סוגי המנסרות. מנסרת הזכוכית מורכבת מגבישים רבים בעלי סדר אמורפי (כלומר חצי – חוסר סדר). בקרן אור לבנה העוברת דרך זכוכית חלה תופעת ה**נפיצה**. כזכור, תופעת הנפיצה מתקבלת משום שמקדמי השבירה של הזכוכית עבור הרכיבים הצבעוניים שונים במקצת זה מזה. לו דפנות הזכוכית היו מקבילות – ולא בזווית חדה – היו הקרניים יוצאות כאשר הן מקבילות. לכן, במקרה כזה היה מתקבל אור לבן המוסט במקצת מכיוון כניסתו, כפי שמוכר מהשתקפות שבורה של כפית בכוס מים. אך היות ובמנסרת הזכוכית הדפנות אינן מקבילות – יוצאות הקרניים הצבעוניות עם זוויות סטייה שונות לכל צבע (כלומר הן לא מקבילות) ומקבלים את תופעת הנפיצה למגוון צבעי הקשת. לכן, העובדה שגבישי הגואנין שוברים או מחזירים רק את הרכיבים אדום וכחול מצביעה לדעתי על אפשרות שמדובר אצלם בתופעה שונה מאשר הנפיצה. אני ממליץ לבדוק במעבדה כיצד בדיוק מסודרים גבישי הגואנין בעור הזיקית. אך בהתחשב בכך שמולקולות הגואנין בנויות משתי טבעות הניתנות לפיתול, אחת ביחס לרעותה, ומאחר וקבוצת גבישי גואנין יוצרת מנסרה, לא מן הנמנע שגבישי הגואנין מונחים אחד על השני כך שהטבעות המחומשות מצויות באותו צד כאשר הן מפותלות במידה מסוימת. עקב כך נוצרים כנראה מרווחים גדולים יותר בצד של הטבעות המחומשות, ביחס למרווחים בצד השני של הטבעות המשושות. כך נוצרת מנסרה. כאשר יש ריבוי שכבות שקופות דקות מוחזרים צבעים מסוימים התלויים בגודל המרווחים שבין השכבות. זוהי תופעת האינטרפרנציה משכבות דקות המוכרת למשל מהצבעים המיוחדים של בועת סבון. אורך הגל החוזר תלוי בגודל המרווחים ובאיזו מידה קיימות שכבות שהמרחקים ביניהם נותנים כפולות שלמות של אורך הגל החוזר. לכן, החזרת שני אורכי גל בלבד, אדום וכחול, מגבישי הגואנין עשויה להצביע על אפשרות שקיימים שני גודלי מרווחים. לא אתפלא אם יתברר שהצד של הטבעות המחומשות מחזיר את אורך הגל הארוך יותר, אדום ואילו הצד של הטבעות המשושות מחזיר את אורך הגל הקצר יותר – כחול. בנוסף לכך, מאחר והמנסרה למעשה שבורה ולא מישורית צפוי שתהיה זווית הטיה מסוימת של החזרת הצבע האדום ביחס להחזרת הצבע הכחול. אם הצבע הכחול מוחזר בכיוון אנכי ביחס לעור הזיקית יוחזר הצבע האדום בזווית מסוימת לתוך הגוף עצמו ואם הוא יתקל בשלוחות של מלנין שחור הוא יבלע ולעניי הצופה יובלט רק הצבע הכחול. בהעדר מלנין בשלוחות המלנופורים יצא החוצה בסופו של דבר גם הצבע האדום. לכן הצופה יראה הן צבע כחול והן צבע אדום המוחזר מגבישי הגואנין והן צבע צהוב המוחזר מהתאים הקסנתופורים. לכן עור הזיקית יהיה בהיר יותר.

לאחר שהבינונו את הצדדים האופטיים הקשורים בצבעי התאים הגואנופורים ונוכחנו כי תאי הגואנופורים עשויים לשמש כמערכות המאפשרות אלסטיות לפיתול של הרקמות העור אצל הזיקית, נותר לענות על השאלה מדוע שלוחות התאים המלנופורים מצויות בין התאים הגואנופורים. כזכור, הזרמת מלנין בשלוחות התאים המלנופוריים נותן הן חיזוק של הרקמות בהם מצויות אותן שלוחות והן בידוד בפני חום וקרני שמש חזקות. ראינו לעיל את החשיבות של תכונות אלו עבור התאים הקסנתופורים המשמשים לסיכה בין שכבות האורגניות. נראה עתה את חשיבות התכונות הללו גם עבור הגואנופורים.

אנו מדברים כל העת על גבישי גואנין ועשויים לטעות ולחשוב שמדובר בגבישים מוצקים קשיחים שאינם דורשים הגנת חוזק. אולם, גבישי הגואנין הם גבישים אורגניים אשר הקשרים בין המולקולות שלהם נוצרים עקב כוחות ואן-דר-ואלס, אשר על חולשתם היחסית עמדנו בפרק הקודם. אי לכך חשוב שהאזור בו מצויים התאים הגואנופורים יהיה עמיד בפני כוחות מכניים חיצוניים. שלוחות המלנין של התאים המלנופורים עשויים לספק את החיזוק הנדרש בעת הצורך. יש לשער שכלל שמצויים עמוק יותר וקרוב יותר לגופי התאים המלנופורים כך עולה החוזק של השלוחות, בדומה לגזעי ענפים של עץ שהם חזקים יותר ככל שהם סמוכים יותר לגזע המרכזי. המצאותם של התאים הגואנופורים מתחת לתאים הקסנתופורים והאריתרופורים מצביעה על כך שעבור הראשונים חשוב יותר עניין החוזק הסביבתי. ניתן להסביר דרישה כזאת בכך שאם מופעל לחץ מכני על גביש גואנין ומפרק אותו – יהיה הרבה יותר קשה לייצר גביש גואנין אחר במקומו, מאשר ייצור של גרגרי שומן קסנתופורים או גרגרים אריתרופורים אדומים.

גם בנוגע לבידוד חום קיימת חשיבות רבה עבור גבישי הגואנין. היות והקשרים בין מולקולות הגביש חלשים מאד, יכולה עליית חום מעבר לרמה מסוימת למוטט את הגביש האורגני. בנייה מחדש של גביש גואנין עשויה לדרוש כמות רבה יותר של אנרגיה מאשר בנייה מחדש של גרגרי שומן קסנתופורים. מכאן הצורך הגדול יותר לשמור על בידוד מחום של התאים הגואנופורים בהשוואה לתאים הקסנתופורים או האריתרופורים.

מיקומם העמוק בדרמיס של התאים הגואנופורים, אשר אמורים לספק את תכונת הגמישות לפיתול, מצביעה אולי גם על כך שתכונת האלסטיות לפיתול חשובה יותר עבור הרקמות הפנימיות של הדרמיס זוחל מאשר הרקמה הסמוכה לאפידרמיס. ניתן להבין זאת כאשר שמים לב למבנה המיוחד של עור הזוחל, אשר בו האפידרמיס מורכב מגרגרים קשקשיים קרניים, כלומר בעל נוקשות נקודתית, ושכבות הדרמיס אמורות לעבור בהדרגה ממצב של שכבה אורגנית חיה באופן מלא בתחתית הדרמיס למצב בעל הנוקשות הנקודתית. תכונת האלסטיות בפיתול חשובה וניתנת למימוש בשכבה אורגנית חיה באופן מלא. תאי הגואנופורים המצויים בשכבה כזאת יחזירו את השכבה למצבה המקורי שלפני הפיתול והדבר יגרור בהדרגה את חזרתן למצב המקורי של השכבות שמעליה, עד לשכבה הנוקשה נקודתית.

#### 4. שינויי הצבעים אצל "הזיקית המצויה" (Chamealeo chamaeleon)

בעמ' 81 בכרך 5 של האנציקלופדיה "החי והצומח של ארץ ישראל" [2] מובא התאור הבא לגבי "זיקית מצויה" (Chamealeo chamaeleon) (הנקראת שם "זיקית מובהקת") תת-מין צפוני:

"הזיקית שוכנת לרוב על שיחים ועצים, שם היא אורבת לטרף. כאשר אינה מופרעת – **צבעה ירקרק** והיא מוסווית היטב על רקע סביבתה. כאשר מזדמן לה חרק בגודל מתאים: זבוב או חגב קטן, היא ממקדת עליו את המבט של שתי עיניה ו'יורה' לעברו במהירות את לשונה הארוכה. חרק הנמצא במרחק של עד 20 ס"מ מפיה נלכד לרוב בלשון הדביקה. הזיקית אינה מרבה לרדת לקרקע, וכאשר היא עושה זאת, משתנה צבעה לרוב, והיא עוטה גוני אפור חום או צהבהב".

ובעמודים 80-81 של אותו מקור [2] ניתנים תאורים לגבי השתנות הצבעים אצל הזיקית המצויה:

"הצבעים משתנים בהתאם לגורמים חיצוניים: אור, טמפרטורה, נוכחות של זיקיות אחרות או נוכחות אויב. **בלילה הצבע אפור בהיר או צהבהב**, לרוב ללא כתמים. השכם בבוקר הצבע אפור-כהה, כמעט שחור. לאחר התחממות הופכים הצבעים בהירים יותר: חום, צהבהב או ירוק. בתנאי טמפרטורה נוחים, ובלא הפרעות, הצבע לרוב ירוק. על רקע זה מופיעים כתמים ונקודות שגודלם וצבעיהם משתנים. פגישה בין שתי זיקיות גוררת שינוי צבע מהירים, תוך שניות ממש. הפרט החזק עוטה צבעי איום: רקע בהיר ירוק או אפור-צהבהבה, זרוע כתמי-צד שצבעם ירוק-אפרפר. הפרט החלש משנה את צבעיו לצבעי כניעה: אפור-כהה אחיד. נקבה רצפטיבית המוכנה להזדווג תופיע בצבעי הזדווגות: אפרפר זיתי חום או בהיר עם כתמי-צד בצבע חום כהה יותר. לנקבה הנושאת בקרבה ביצים מפותחות – צבעי הריון: רקע אפור-ירקרק מנומר בנקודות צהובות הפזורות על כל הגוף. מפגש עם זיקית אחרת מביא להבלטת צבעי ההריון: צבע הרקע הופך שחור, הנקודות הצהובות מתבלטות ביתר שאת ומופיעים כתמי-צד צהובים.

צבעי הזיקית נקבעים על-ידי צירופים מורכבים של צבענים (פיגמנטים) וצבעים פיסיקליים. לצבענים, המצויים בתאי-צבע (כרומטופורים), הפזורים בעורה של הזיקית, צבעי שחור וצהוב. בין הכרומטופורים יש תאים שקופים וחסרי צבע המחזירים צבע פיסיקלי כחול. פתיכת הצבע הפיסיקלי עם הצבעים הפיגמנטריים מקנה לזיקית את צבעיה. לדוגמה: הצבע הירוק הוא תוצאה של פתיכת צהוב פיגמנטרי עם כחול פיסיקלי. "

עד כאן הציטוט לגבי צבעיה של הזיקית המצויה והארועים הגורמים להשתנותם. לאור כל מה שהבהרנו לעיל, ביחס למשמעויות הפיסיקליות של הצבעים, ננסה לבדוק עתה כיצד ניתן להסביר את הצבעים ושינויים מנקודת מבט פיסיקלית.

לשם כך נזכיר בטבלה הבאה **תוספות** התכונות הפיסיקליות הקשורות, לדעתי, עם כל צבע. יצוין כי במאמר זה בחרתי לדון רק תכונות פיסיקליות מכניות וחומניות. אך קימות גם תכונות פיסיקליות נוספות, כגון חדירות לנוזלים, חדירות לגזים ועוד, אליהן אתיחס בהזדמנות אחרת.

צבע	תוספת תכונות מכניות	תוספת תכונות חומניות
שחור	נוקשות למתיחה	בידוד חום
אדום	אלסטיות לכיפוף	התפשטות בחום
צהוב	נוקשות לגזירה	שימור חום
כחול	אלסטיות בפיתול	

5. סיכום

(לישראל – להמשיך)

## מקורות.

1. Bruce H. Mahan, University Chemistry, Addison-Wasley Publishing Company, 1967.
2. החי והצומח של ארץ ישראל – ערך 5 (זוחלים ודוחיים) - עורך ראשי ע. אלון, עורך כרך 5 א. ארבל, הוצאת משרד הבטחון והחברה להגנת הטבע, (1991).
3. A. M. Lucas, Avian Anatomy Integument, Part II, Washington D.C., September 1992.
4. A. A. Voitkevich, The Feathers and Plumage of Birds, University of Washington Press, 1966.
5. א. פוליקוב-מיבר ואחר', פיסיוולוגיה של הצמח, הוצאת עם עובד ודביר תל אביב (1968).
6. ר. איקן וי. זקבר, לקסיקון דביר – כימיה, הוצאת דביר (1991).
7. האנציקלופדיה העברית, חברה להוצאת אנציקלופדיות.