

20.11.2002

ישראל פריד

<http://ifired22.tripod.com>

### המשמעות הפיסיקלית של הצבעים בבעלי חיים וצמחים

#### הקדמה

הדעה המקובלת כיום היא שהצבעים בבעלי חיים וצמחים נועדו לצורכי הסוואה, אזהרה, חיזור וכו', אשר אכנה אותן כאן בשם כולל "מטרות חברתיות". בשנת 1984 נוכחתי לתדהמתי כי ניתן להסביר הן את הצורות והן את הצבעים בבעלי חיים וצמחים על סמך עקרונות פיסיקליים-הנדסיים פשוטים המוכרים לי היטב מטכנולוגיות החלל בהם התמחיתי. הבנתי שהתכונות הפיסיקליות מהוות למעשה "מטרות ראשוניות" החשובות לצורך קיומי ראשון במעלה עבור הצמחים ובעלי החיים, ברמת עדיפות גבוהה בהרבה מ"המטרות החברתיות". למרות שאינני ביולוג, אם כי חובב טבע אנוכי, התחלתי לחפש דוגמאות נוספות והסברים פיסיקליים לצורות ולצבעים בחי ובצומח. בד בבד התחלתי לחפש התאמות בין הצבעים השונים לבין תכונות פיסיקליות-הנדסיות בעיקר ריתקה אותי השאלה הגדולה האם ניתן למצוא התאמה חד-חד-ערכית בין הצבעים לבין התכונות הפיסיקליות כך שהתאמה זאת תתקיים הן בחי, הן בצומח והן בדומם. לאחר מחקר אישי של כ-18 שנים על סמך תצפיות בטבע ועיון בספרות המקצועית, עם מעט מדידות (אינני ניסיונאי), עלה הדבר בידי והרכבתי טבלה כזאת המאפשרת להסביר את מגוון הצבעים בחי, בצומח ובדומם משיקולים פיסיקליים. בפברואר השנה התחלתי להעלות את רעיונותי גם באתר האינטרנט (באנגלית), <http://ifried22.tripod.com> ובו בין היתר הסברים על התאוריה החדשה הזאת, כולל טבלת ההתאמות החד-חד-ערכית, וכן מאמרים ורעיונות שלי בנושאי פיסיקה תאורטית, טכנולוגית חלל ועוד. להלן אסביר בקצרה את עקרונות התיאוריה החדשה, אביא טבלה מקוצרת, עם הערות לגבי המונחים השונים בה.

#### פרק א. עקרונות התיאוריה

בפרק זה נביא דוגמא מחיי היום יום אשר תבהיר לנו את העקרונות הבסיסיים של התיאוריה.

##### א.1 דוגמת הבניין שלפני צביעה.

כאשר מתבוננים בבניין לפני שלב הצביעה, ניתן להסיק מהצבעים השונים על סוגי החומרים המרכיבים כל חלק ותכונות אותם חומרים. הצבע האפור למשל מרמז על בטון. צבע חום מרמז על קרש עץ. צבע כחול-שחור-מבריק מרמז על פלדה, וכו'. לכל אחד מהחומרים הללו יש התכונות הפיסיקליות הספציפיות אשר בעטיין משתמשים בו בחלקי הבניין השונים. למשל לבטון יש חוזק-ללחץ. אמנם במידה פחותה מזאת של סלע גרניט אך יותר מאשר לקרש הנלחץ במאונך לסיביו. לעומת זאת לקרש יש חוזק במתיחה גדול יותר מאשר לבטון אך נמוך בהרבה מזה של פלדה. כאשר אנו מתבוננים על עמוד הבטון ורואים פסים בצבע כחול-שחור-מבריק אנו מסיקים כי לחלק זה של הבית יש חוזק די טוב לחיצה וחוזק גבוה למתיחה. אולם, לאחר שצובעים את כל הבית בצבע אחיד "מלאכותי", עשוי להתקשות אפילו איש מקצוע מיומן, שלא היה עד למהלך הבנייה, לדעת מאילו חומרים בדיוק בנוי כל חלק. כאשר מתכננים בניין לוקחים בחשבון "מטרות ראשוניות" כגון חוזק מכני, בידוד חום,

בידוד קור, מניעת חדירות גשמים וכו'. רק לאחר שמושגות בתכנון המטרות החיוניות הללו יש מקום לגשת לתכנון "המטרות החברתיות" כגון יופי, הגנה מפורצים וכו'. לו היה בידינו לתכנן יצירת צמח או בעל חיים היינו נוקטים כנראה באותה דרך שבה מתכננים בניין. ראשית תכנון השגת "המטרות הראשוניות" ורק אחר כך הוספת "המטרות החברתיות" הנ"ל.

## 2.א הטענה המרכזית של התיאוריה

הטענה המרכזית של התיאוריה החדשה שלי היא: **בטבע החי והצומח אין "צביעה מלאכותית"**. הצבע שאנו רואים בכל חלק מרמז על החומרים והתכונות הפיסיקליות המתווספות לאותו חלק. בטבע, הוספת "צבע מלאכותי" ל"מטרות חברתיות" היא גם יקרה, מבחינת האנרגיות הדרושות להשגתה, וגם עלולה לפגוע בתפקודו העיקרי של אותו חלק. למשל, הצבעים שאנו רואים על כנף הפרפר, כולל צבעי האבקות המיוחדות בקשקשים, נחוצים לפרפר לעצם התעופה בתנאי טמפרטורה, צפיפות אויר ולחות משתנים. אך אם במהלך האבולוציה היה הפרפר מוסיף לעצמו "צבע מלאכותי" היה גדל המומנט (כוח כפול מרחק) של כנפיו ביחס לאזור החיבור לגוף. גידול המומנט היה דורש מגופו להיות חזק יותר ומסיבי יותר, כלומר עליה במשקל. הגדלת משקל הגוף היתה מצריכה כנפיים גדולות יותר או קצב נפנוף מהיר יותר. כל זאת כדי להשיג את המטרות הפיסיקליות הראשוניות. תוספת חוזרת של צבע למטרות "חברתיות" היתה מגדילה שוב את המומנט, וחוזר חלילה.

## 3.א סדר חקירת החי והצומח.

במחקרי נוכחתי שכדי להבין את המשמעות הפיסיקלית של הצבעים בפרט כלשהו מהחי או מהצומח רצוי לבצע את הבירור על פי הסדר הבא:

א) מהו **תפריט** הצרכים המיוחדים של **אותו פרט**, על פי סדר חשיבותם: מכניים, חומניים, חדירותיים, מזון נוזלי ומוצק, קרינות א"מ וצרכים ביולוגיים כגון חילופי חומרים, רבייה וכו'.

ב) מהן **השיטות והדרכים** להשגת **אותו תפריט** צרכים חיוניים.

ג) מהם **הכישורים הנדרשים מכל חלק** באותו פרט כדי שיוכל לנקוט בשיטות ובדרכים הללו.

ד) מהי **הצורה והמבנה** של כל חלק כדי **לממש את הכישורים** הללו ומהם חומרי הבניין.

ה) מהם **הצבעים הפיסיקליים של אותו מבנה**. (משבירת קרני אור, אינטרפרנציה וכו').

ו) אילו **חומרים יש להוסיף** לחלק כדי שהוא יממש את הכישורים הנ"ל למרות מגבלות הצורה והמבנה הבסיסי.

ז) מהם **הצבעים** של חומרים נוספים אלה (פיגמנטים).

רק לאחר שענינו על סדרת שאלות אלו, ואנו מבינים את "**המטרות הראשוניות**" של כל חלק של אותו פרט, יש טעם לשאול אילו **שימושים נוספים** יכול לעשות אותו פרט בכל אחד מחלקיו, כלומר מהן "**המטרות המשניות**". למשל, המטרה הראשונית של ידנו היא ללקט מזון ולקרבו אל פינו. מטרות משניות יכולות להיות זריקת אבנים לשם ציד חיות, הבערת אש, ציור וכו'.

בפרק הבא נעסוק בהגדרת צבעים, על פי הצבעים שבטבע, נביא טבלת התאמות בין הצבעים לתכונות הפיסיקליות המכניות והחומניות ונבהיר את המושגים הקשורים בתכונות אלו.

## פרק ב. התאמת צבעים ותכונות פיסיקליות.

### 1. כללי

בפרק זה נעסוק בהגדרת צבעים, על פי הצבעים שבטבע, נביא טבלת התאמות בין הצבעים לתכונות הפיסיקליות המכניות והחומניות ונבהיר את המושגים הקשורים בתכונות אלו.

### 2. הגדרות הצבעים

**הערה כללית:** כל הגדרות הצבעים כאן נעשות על פי הצבעים של השמיים והשמש במצבים שונים. זאת משום שנוכחתי שהצומח בעיקרו וגם חלק גדול מהחי פועל למעשה על פי הקרינות מהשמש והשמיים. כל ההגדרות (פרט ל"שחור-לילה") מתייחסות למצב כאשר השמיים נקיים לחלוטין מעננים והתצפית נעשית ביום שוויון האביבים, דהינו ב-21 במרץ, כאשר השמש מצויה מעל קו המשווה ואורך היום שווה לאורך הלילה. כמו כן נדרש הצופה לעמוד על שפת הים. (הערה: באותו יום ושעה יראה אותו צבע, לפי ההגדרה כאן, בגוונים מעט שונים באזורים השונים על פני כדור הארץ. יכולנו לדרוש שלצורך הגדרת הצבע תתבצע התצפית מקו המשווה. אולם לא עשינו זאת מהשיקול המהותי שבעולם החי והצומח מתקבלים צבעי השמיים והשמש על פי המיקום והתנאים באותו אזור, הן מבחינה גיאוגרפית והן מבחינה טופוגרפית. בהתאם לכך גם מתפתחים הצומח והחי המקומי על פי הצבעים הטבעיים באזורם הם. אמנם כאשר יש נדידות גדולות נתקלים החי והצומח בצבעים טבעיים שונים במעט. אך עדיין הגנטיקה שלהם קשורה למקום המקורי בו הם התפתחו מבחינה אבולוציונית. אם יש הסתגלות למקום החדש לאחר דורות רבים היא תהיה על פי הרקע המקורי בתוספת לשינויים על פי התנאים החדשים.

**הגדרת כחול-שמיים:** צבע השמיים בזוית ישרה (90 מעלות) ביחס לכיוון השמש המישור המחבר את הצופה והשמש, כלומר כאשר הצופה מסתכל אל השמיים וגבו בכיוון השמש. כל זאת בתנאי התצפית הנ"ל.

**הגדרת אדום-שקיעה:** צבע השמש בשקיעה ברגע שכדור השמש נוגע באופק בים. כל זאת בתנאי התצפית הנ"ל.

**הגדרת צהוב-שמש:** צבע השמש בזמן מוגדר לפני תחילת שקיעה. כלומר לפני שכדור השמש נוגע באופק הים. עדיין לא הצלחתי להגדיר בדיוק את הזמן המוגדר. זאת משום שלא נזדמן לי לבדוק את הנושא ביום הנדרש, 21 במרץ, כאשר אני על שפת הים ואין עננים בשמיים. על פי מעקבים מאזור השפלה בישראל במהלך ימים שונים של השנה, אני מתרשם ש"הזמן המוגדר" יהיה בין רבע שעה לחצי שעה לפני תחילת השקיעה.

**הגדרת לבן-ענני קיץ:** צבע עננים לבנים בקיץ.

**הגדרת שחור-לילה:** צבע של לילה חשוך לחלוטין כאשר יש עננים עבים בשמיים ולא רואים אפילו כוכב אחד. בניגוד להגדרות הקודמות, כאן אין חשיבות למקום ויום התצפית ובלבד שלא תגיע קרינת אור ממשום כלשהו, לא מישוב מרוחק, לא מסיגריה רחוקה וכו'.

**הגדרת אולטרה-סגול:** מה ש"רואים" כאשר מתסכלים על השמש בזניט דרך גוף המסנן את כל הצבעים הנראים לנו (סגול עד אדום) ואינפרא אדום. חרקים מסוימים, כגון דבורים, רואים אולטרה-סגול-קרוב (אס"ק). כאשר אנו מסתכלים אל סביבת השמש כשהיא בזניט אנו מבחינים שהסביבה הזאת מבריקה מאד. הברק הזה נובע מהאולטרה-סגול הקרוב (אס"ק). כאשר קרני אס"ק פוגעים באטומים שבאטמוספירה הם מעוררים את האלקטרונים לרמות אנרגטיות גבוהות. הקפיצות חזרה של האלקטרונים מתבצעות במקרים רבים על ידי פליטת אנרגיות המתאימות לצבעים הנראים, סגול עד אדום וגם לאינפרא-אדום. לכן הקרינה האס"ק מגבירה מאד את עוצמת הצבעים הנראים בשמיים ומכאן הברק שלהם. גופים שקופים ומבריקים מצביעים על העברת כל הצבעים הנראים ובנוסף - על העברת אולטרה סגול. לכן ציינתי בטבלה ליד אולטרה-סגול "שקוף-מבריק".

**הגדרת אינפרא-אדום:** להערכתני ניתן להגדירו כצבע השמיים בכיוון האופק בו שקעה השמש, כחצי שעה עד שעה לאחר השקיעה. רואים גוון עכור-מט. ממעקבים שעשיתי אחרי פרחים רבים הנפתחים דווקא לעת ערב הסקתי כי הם מנצלים את הקרינה של אינפרא-אדום-קרוב (אא"ק). אצל זוחלים מסוימים, כגון נחשים, יש ניצול של קרינת אינפרא-אדום ללכידת חיות בעלות דם חם, כגון עכברים, המצויים במחילות אפלות. לי נדמה שכאשר אנו עוצמים עיניים ומפנים את הראש לעבר השמש או נורת להט אנו רואים את הקרינה האינפרא-אדומה החודרת דרך העפעפיים. כאשר מתבוננים בעפעפיים

סגורות לעבר נורת ניאון האפקט חלש בהרבה, אולי משום שנורת להט מפיצה הרבה יותר חום המתבטא בקרינת אינפרא-אדום גדולה יותר.

### ב.3. טבלת ההתאמות

טבלה 1: טבלה מקוצרת להתאמת צבעים ותכונות פיסיקליות. (המספרים בסוגריים העגולים ( ) נועדו להמחשה. הם אינם מדעיים. סך המספרים לכל צבע - 10. מספור ההערות מובא בסוגריים המרובעים [ ] . הגדרות הצבעים ניתנות בהמשך).

צבע	תוספת תכונות <sup>[1]</sup> מכניות <sup>[2]</sup>	תוספת תכונות חומניות <sup>[3]</sup>
<b><u>א) צבעים בסיסיים</u></b>		
שחור - לילה	קשיחות <sup>[5]</sup> לתוספת מתיחה <sup>[6]</sup> (10)	בידוד <sup>[11]</sup> מעודף חום (10)
לבן - ענני קיץ	אלסטיות <sup>[4]</sup> לתוספת מעיקה <sup>[10]</sup> (10)	בידוד מעודף קור <sup>[12]</sup> (10)
אדום-שקיעה	אלסטיות לתוספת כיפוף <sup>[7]</sup> (10)	התפשטות בהוספת חום (10)
צהוב-שמש	קשיחות לתוספת גזירה <sup>[8]</sup> (10)	שימור עודף חום (10)
כחול-שמיים	אלסטיות לתוספת פיתול <sup>[9]</sup> (10)	התכווצות בהוספת קור (10)
שקוף+אולטרה-סגול (שקוף-מבריק)	אלסטיות לתוספת מתיחה (צמיגות). (10)	שימור עודף קור (10)
עכור+אינפרא-אדום (עכור-מט)	קשיחות לתוספת מעיקה. (10)	קרינת עודף חום (10)
<b><u>ב) שילובי צבעים חצי-חצי</u></b>		
אפור (שחור-לילה + לבן-ענני קיץ)	קשיחות במתיחה (5) + אלסטיות במעיקה (5).	בידוד חום (5) + בידוד קור (5).
כתום (אדום שקיעה + צהוב שמש)	אלסטיות בכיפוף (5) + קשיחות בגזירה (5).	התפשטות בחום (5) + שימור חום (5).
ירוק (צהוב שמש + כחול שמיים)	קשיחות בגזירה (5) + אלסטיות בפיתול (5).	שימור חום (5) + התכווצות בקור (5).
ארגמן (אדום שקיעה + כחול שמיים)	אלסטיות בכיפוף (5) + אלסטיות בפיתול (5).	התפשטות בחום (5) + התכווצות בקור (5).

תכלת (כחול שמיים + לבן-ענני קיץ)	אלסטיות בפיתול (5) + אלסטיות במעיכה (5).	התכווצות בקור (5) + בידוד קור (5).
צהבהב (צהוב-שמש + לבן-ענני קיץ)	קשיחות בגזירה (5) + אלסטיות במעיכה (5).	שימור חום (5) + בידוד קור (5).
אדמדם (אדום-שקיעה + לבן-ענני קיץ)	אלסטיות בכיפוף (5) + אלסטיות במעיכה (5).	התפשטות בחום (5) + בידוד קור (5).
כחול-כהה (כחול-שמיים + שחור)	אלסטיות בפיתול (5) + קשיחות במתיחה (5).	התכווצות בקור (5) + בידוד חום (5).
אדום-עז (אדום-שקיעה + אינפרא-אדום)	אלסטיות בכיפוף (5) + קשיחות למעיכה (5).	התפשטות בחום (5) + קרינת חום (5).
סגול (כחול-שמיים + אולטרא-סגול)	אלסטיות בפיתול (5) + אלסטיות למתיחה (5).	התכווצות בקור (5) + שימור קור (5).
<b>ד) שילובים נוספים</b>		
חום (שחור + כתום) (60% + 40%).	קשיחות במתיחה (4) + קשיחות בגזירה (3) + אלסטיות בכיפוף (3) = (גמישות בכיווץ) =	בידוד חום (4) + התפשטות בחום (3) + שימור חום (3).

## הערות לטבלה

- [1] משמעות "תוספת תכונות": בטבלה מדובר בתוספת תכונות פיסיקליות. התוספת היא ביחס לחלק הסמוך ביותר לאזור בעל הצבע הנדון, או ביחס לגבולות ה"נורמליים" של התכונה. למשל אם יש כתם צהוב על עור כחול, אזי תוספת התכונות הפיסיקליות של צהוב הן ביחס לתכונות הפיסיקליות המותאמות לעור הכחול. או למשל, אם לטמפרטורת הגוף הפנימי מותר להיות בגבולות מוגדרים בין "גבול עליון" ו"גבול תחתון", אזי "תוספת-חום" פירושה טמפרטורה שמעל הגבול העליון, ו"תוספת-קור" פירושה טמפרטורה שמתחת לגבול התחתון.
- [2] משמעות "תכונות מכניות": תכונות המבטאות תנועה יחסית.
- [3] משמעות "תכונות חומניות": תכונות הנובעות כתוצאה מטמפרטורה יחסית.
- [4] משמעות "אלסטיות": אלסטיות מאפשרת חזרה למצב המקורי של גוף לאחר הסרת הכוחות ששינו את צורתו. האלסטיות מתאפשרת כאשר יש מספר חלקים כך שכל חלק הוא באינטראקציה הדדית עם חלק אחר. למשל חלק א' באינטראקציה הדדית עם חלק ב'. חלק ב' באינטראקציה הדדית עם חלק ג'. חלק ג' באינטראקציה הדדית עם חלק ד', וכו'. אלסטיות אינה מנוגדת לקשיחות אשר תוגדר להלן. גוף יכול לגלות קשיחות לשינוי צורתו, אך אם הצורה שונתה ויש בו אלסטיות - הגוף ישוב למצבו המקורי. למשל קפיץ חזק.

[5] משמעות "קשיחות": קשיחות מקשה על ביצוע שינוי צורה בגוף. הקשיחות מתאפשרת כאשר כל חלק בקבוצה מצוי באינטראקציה הדדית עם כל החלקים שבסביבתו עד כדי כך שאינטראקציה עם חלק אחד שסביבו מבטלת אינטראקציה עם חלק אחר סביבו. למשל אם חלק מחובר לכמה קפיצים סביבו - כל ניסיון להזיז את החלק לכיוון אחד מגדיל את ההתנגדות מהצד הנגדי. קשיחות אינה מנוגדת לאלסטיות שהוגדרה לעיל. גוף יכול לגלות קשיחות לשינוי צורתו, אך אם הצורה שונתה ויש בו אלסטיות - הגוף ישוב למצבו המקורי. למשל קפיץ חזק.

[6] משמעות "מתיחה": כאשר האינטראקציה ההדדית בין החלקים בכל שורה מביאה לשינוי המרווחים בין החלקים בשורה.

[7] משמעות "כיפוף": כאשר יש אינטראקציות מנוגדות בין שתי שורות. למשל כאשר בשורה העליונה יש מתיחה ובשורה התחתונה יש כיווץ. זה מה שקורה למשל כאשר מכופפים שתי מתכות צמודות. האחת נמתחת והשניה מתכווצת.

[8] משמעות "גזירה": כאשר האינטראקציה היא בין שורות (חיכוך). גזירה היא מושג הנדסי המתייחס למצב שבו שני כוחות שווים במידתם ונגדיים בכיווניהם פועלים בניצב לגוף, כגון קורה או משטח. לפני שהגוף נגזר מקבל חתך הגוף שינוי זוויתי כתוצאה מתזוזה יחסית בין שכבותיו. מכאן הקשר לחיכוך.

[9] משמעות "פיתול": כאשר האינטראקציה היא של פיתול הדדי בשורה המביאה לסיבוב חלק אחד בשורה סביב ציר השורה, ביחס לחלק אחר.

[10] משמעות "מעיקה": מעיקה היא לחיצה מקומית, דהינו כאשר גוף נלחץ רק באזור קטן שלו. במעיקה משולבים באופן מקומי האינטראקציות שלעיל: מתיחה, כיפוף, גזירה ולעיתים קרובות גם פיתול, למשל כאשר תוך כדי לחיצה מתבצעת גם תנועה סיבובית כדוגמת בורג. כאשר גוף הוא אלסטי למעיקה פירושו של דבר שהוא אלסטי לכיפוף ופיתול אך נוקשה לגזירה. לכן לא מפתיע שהצבע לבן-ענני קיץ מותאם בטבלה לתכונה "אלסטיות למעיקה", שהוא שילוב של התכונות המכניות של הצבעים אדום-שקיעה, כחול-שמיים וצהוב-שמם.

[11] משמעות "בידוד": כאשר החום או הקור אינם עוברים פנימה. בחי ובצומח המשטחים המבודדים מקרינות מסוימות עושות זאת על ידי בליעת אותן קרינות. במשטחים כאלה אם יש החזרה יש גם חדירה מסוימת. למשל עלה כותרת לבן יראה לבן בשני צדדיו אלא אם יש בצד השני שכבה נוספת הבולעת חלק מאורכי הל.

[12] משמעות "קור": על פי תאוריה חדשה שלי, לקור יש ישות פיסיקלית עצמאית. דהינו לא כהפחתת חום גרידא אלא כמשהו הקיים בזכות עצמו. בדיון בהמשך על תכונת "התכווצות בקור" המותאמת לצבע כחול-שמיים יובהר הנושא ביתר פירוט.

עד כאן ההגדרות של המונחים הפיסיקליים שבטבלה 1. בפרק הבא נעמוד על הקשרים בין התכונות הפיסיקליות, המכניות והחומניות, אשר הותאמו לצבעים הבסיסיים בטבלה 1.

## פרק ג. הקשרים בין התכונות המכניות לתכונות החומניות בטבלה:

בפרק זה נעמוד על הקשרים בין התכונות הפיסיקליות, המכניות והחומניות, אשר הותאמו לצבעים הבסיסיים בטבלה 1 בפרק ב, כאשר הגדרות הצבעים ניתנו בתחילת פרק ב.

### כחול שמיים:

**התאמת תוספת תכונות פיסיקליות: תכונה מכנית: "אלסטיות לתוספת פיתול". תכונה חומנית: "התכווצות בעודף בקור".**

**הקשר בין התכונות:** ההתכווצות נוצרת עקב פיתול. על פי תיאורית הקור חדשה שלי - קור הוא בעל ישות עצמאית הבאה לידי ביטוי במערבולות. כאשר מערבולת פוגעת בגוף שאינו מוצק לחלוטין היא גורמת לפיתול כלשהו באזור הפגיעה.

למשל אם מערבולת אויר פוגעת בפרווה או בעור של בעל חי יבשתי, אזור הפגיעה יקבל פיתול מסוים שצורתו וכיוונו תלויים באופי המערבולת, בכיוון פגיעתה ומה קרה לאחר הפגיעה: האם המערבולת נהרסה כליל, או האם היא קיבלה סטייה, בדומה לחוק ההחזרה של אור, או שמא היא נחלשה וסטתה לכיוון שונה, וכו'. כל מערבולת ניתן לאפיין על ידי צורתה, מידותיה, מהירות הצירקולציה שלה וכן מהירותה הליניארית. עצמת המערבולת והשפעותיה תלויה בכל אחד מהפרמטרים הללו, ואולי גם בפרמטרים נוספים. בהתאם לפרמטרים אלה ניתן להגדיר את האנרגיה האצורה במערבולת.

מערבולת בנוזל צפויה להיות אנרגטית יותר מאשר מערבולת אויר בעלת אותם ממדים ומהירויות ליניאריות וסיבוביות. זאת משום שצפיפות הנוזל גדולה בהרבה מצפיפות האויר. נניח שמערבולת מים פוגעת בעור של בעל חי ימי. כדי לקבל את אותה ההשפעה שהיתה למפגש בין מערבולת האויר והעור של בעל החי היבשתי יש לקחת מערבולת נוזל בעלת מידות קטנות בהרבה ממידות מערבולת האויר. לכן יהי לנו קשה יותר להבחין במערבולת נוזלית הפוגעת בעור של בעל החי הימי מאשר במערבולת אויר הפוגעת בעור של בעל החי היבשתי. מאחר ומידות המערבולת הנוזלית קטנות בהרבה מזאת של האויר, יהיה גם האיזור המפותל בעור הימי קטן בהרבה. אך גם בעור הימי יהיה פיתול כלשהו, כתוצאה מפגיעת מערבולת נוזלית, וכתוצאה מפיתול זה תהיה בו התכווצות כלשהי. כלומר, גם בנוזלים תכונת ההתכווצות בקור קשורה עפ אלסטיות בפיתול.

גם במקרה הקודם של מערבולת אויר הנתקלת בפרווה או עור של בעל חי יבשתי, וגם במקרה של מערבולת מים הנתקלת בעור של בעל חי ימי, ניתן לאמור כי מדובר במערבולת בתווך בעל צפיפות נמוכה הפוגשת תווך בעל צפיפות גבוהה יותר. אצל בעלי חיים בעלי רקמות בעלות צפיפויות שונות, כגון רקמת שריר לעומת רקמת **סחוס**, ניתן לדבר גם על מערבולת של רקמה בעלת צפיפות נמוכה הפוגשת רקמה בעלת צפיפות גבוהה. המערבולת במקרה של רקמה באה לידי ביטוי בעיוות מקומי מסודר של הרקמה. גם במפגש בין מערבולת של רקמה בעלת צפיפות נמוכה לרקמה בעלת צפיפות גבוהה ניתן לצפות בעקרון לתופעות דומות לאלו שבין נוזל ועור, אם כי התופעות בתווך הצפוף תהיינה בעלות מידות קטנות בהרבה. כאשר פוגעות בעור בעל החיים מערבולות אויר (שיקראו כאן "קור גזי") או מערבולות נוזליות ("קור נוזלי") מתפתל העור במידה מסוימת, כלומר הרקמות הפחות צפופות של הגוף מכילות, כתווך, מערבולת זעירה ביותר. מערבולות רקמתיות זעירות אלו הן מה שיקרא כאן "קור רקמתי". מפגש של "קור רקמתי" זה בסחוס למשל, מפתל במידה עוד יותר זעירה את שפת הסחוס. מערבולת סופר זעירה בסחוס ("קור סחוס") מכילה מבחינה אנרגטית כמות השווה לאנרגיה האצורה בהרבה מאד מערבולות רקמתיות ("קור רקמתי"), כאשר האנרגיה האצורה בכל מערבולת רקמתית שווה לאנרגיה האצורה בהרבה מאד מערבולות נוזליות ("קור נוזלי") ובמספר גדול פי כמה של מערבולות גזיות ("קור גזי"). לכן אני טוען שהסחוס שומר קור, כפי שמופיע בטבלה לגבי תכונה חומנית של אולטרה סגול (שקוף מבריק). כידוע, יש רקמות סחוס שקופות לחלוטין כמו זכוכית ויש רקמות סחוס שקופות-עכורות. לאור הנאמר לעיל, אני משער שהרקמות השקופות-עכורות הן רקמות שקופות עם תוספת של צבע כחול-שמיים המצביע, על פי הטבלה שלי, על התכונה המכנית "אלסטיות בפיתול" ועל התכונה החומנית "התכווצות בקור". הסחוס השקוף לחלוטין מצביע, על פי הטבלה על העברת "אולטרה סגול" ועל התכונה המכנית "אלסטיות בגזירה" (צמיגות) ועל התכונה החומנית "שימור קור". לכן נראה

לי שהסחוס השקוף-עכור גם שומר קור וגם מתקצר בקור. אולי זה מסביר מדוע רבים מאיתנו סובלים מכאבי מפרקים כאשר קר מדי.

ראה במאמר שלי "הפיסיקה של עור הזיקית וצבעיו" מנובמבר 2001 בקשר לתכונות המכניות הקשורות לכחול ובמיוחד לגבי ההסבר על הבסיס "גואנין" ומדוע דווקא גבישי הגואנין קשורים לתכונת הפיתול.

### אדום-שקיעה:

**התאמת תוספת תכונות פיסיקליות: מכנית: "אלסטיות לתוספת כיפוף". חומנית: "התפשטות בעודף חום".**

**הקשר בין התכונות:** ההתפשטות בחום נעשית תוך כדי כיפוף. לאחר שהחום פוחת חוזרת הצורה למצבה המקורי ומכאן האלסטיות. כאשר גוף מוחזק בקצותיו ומתפשט הוא יתכוף. לכן למשל בפסי רכבת יש מרווחים בין פסי המתכת שלאורך המסילה. כאשר הרכבת עוברת על הפסים הם מתחממים ומתפשטים. אם לא היה להם מקום להתפשט המסילה היתה מתכופפת והרכבת היתה עלולה להתהפך. מכאן הקשר בין "אלסטיות לכיפוף" ו"התפשטות בחום" המותאמים אצלי לצבע אדום-שקיעה.

ראה במאמר שלי "הפיסיקה של עור הזיקית וצבעיו" מנובמבר 2001 בקשר לתכונות המכניות הקשורות לאדום.

### צהוב-שמש

**התאמת תוספת תכונות פיסיקליות: תכונה מכנית: "קשיחות לתוספת גזירה". תכונה חומנית: "שימור עודף חום".**

**הקשר בין התכונות:** הקשיחות בגזירה נעשית על ידי גרגרים כדוריים המצויים בין שכבות. בכך הם מונעים חיכוך. ראה במאמר שלי "הפיסיקה של עור הזיקית וצבעיו" מנובמבר 2001 בקשר לתכונות המכניות של גרגרים כדוריים אלה ומדוע דווקא הם מוסיפים לתכונה קשיחות לגזירה. גרגרים כדוריים אלה שומרים גם על חום. הם מצויים בשומנים רבים וכידוע שומן שומר על חום.

לא ברור לי עדיין לחלוטין המנגנון הפיסיקלי של גרגרים אלה המביא לכך שהם גם יתנו קשיחות לגזירה וגם ישמרו על חום. אני מעלה כאן השערה ראשונית אשר רצוי יהיה לבדוק אותה במחקר מעמיק.

הגרגרים הללו מתוארים כבעלי צורות סגלגליות או אליפסואידות. נניח שהגרגרים זחים ומקושרים ביניהם באופן טורי בקצות הצירים הארוכים של הגרגרים. נדמיין שאנו מציבים כמה שורות מקבילות של גרגרים מקושרים כאלה על גבי משטח קשיח. נקבע מערכת צירים אורטוגונלית  $XYZ$  כך שציר  $X$  מקביל לשורות, ציר  $Y$  ניצב לשורות וציר  $Z$  אנכי בכיוון מעלה - דהינו אנכי למשטח. עתה נניח שאנו מניחים על גבי שורות הגרגרים משטח נוסף וננסה לדמיין מה קורה כאשר המשטח העליון נע בכיוון ציר  $Y$  הניצב לשורות, דהינו בכיוון הציר **הקטן** של הגרגרים. נניח שבגין כוח הכובד גורמת הנחת המשטח העליון להתפחסות מסוימת של כל הגרגרים בכיוון ציר  $Z$ . כאשר המשטח העליון נע בכיוון ציר  $Y$  מתגלגלים כל הגרגרים במקביל סביב ציר  $X$ . לכן הקטע הפחוס בכל גרגיר משתנה עם התגלגלותו. יש להניח שמיד לאחר שנותק המגע של הקטע הפחוס עם המשטח חוזר אותו קטע למצבו המקורי הלא פחוס. שאם לא כן, כעבור מספר גלגולים הגרגיר יהיה כל כך פחוס שיפסיק למלא את תפקודו כמונע חיכוך בין המשטחים. חזרת הקטע הפחוס למצבו המקורי פירושה אלסטיות בכיפוף. לכן התכונה העיקרית של גרגרים אלה היא "אלסטיות בכיפוף". נעבור לראות את התכונה השניה בחשיבותה, "אלסטיות בפיתול".



כל עוד התנועה של כל המשטח העליון היתה בכיוון  $Y$  הניצב לשורות התגלגלו כולם יחד במקביל ולכן כל גרגיר לא "ראה" הבדל בין מצבו שלו למצבו של הגרגר הסמוך לו בגין התנועה. נניח עתה שכל המשטח העליון נע במקביל לשורות בכיוון  $X$ . במקרה כזה הגרגרים לא יתגלגלו ולמעשה שורות הגרגרים יהוו משטח בפני עצמו אשר יתחכך עם שני המשטחים, העליון והתחתון. לכן במצב כזה הגרגרים אינם ממלאים את תפקידם במניעת חיכוך. מה קורה במצב הביניים, כלומר כאשר המשטח העליון נע בזווית של 45 מעלות ביחס לציר השורות  $X$ , במישור  $XY$ . אם היה גרגר אחד, יש להניח שהוא היה מסתובב סביב ציר  $Z$  בזווית של 45 מעלות ומתגלגל בכיוון תנועת המישור. אך מכיוון שהגרגרים קשורים ביניהם תהיה התנגדות חלקית לתנועת המשטח העליון וניתן לצפות לעיוות מסוים של כל גרגר, כלומר לפיתולו. כל גרגר יראה את שכנו בצורה שונה במקצת מאשר לפני התנועה. עם הפסקת תנועת המשטח העליון ישובו הגרגרים למצבם המקורי שלפני התנועה. כלומר אנו מקבלים כאן אלסטיות בפיתול. מכאן שניתן לצפות ממערכת גרגרים כזאת גם לתכונה "אלסטיות בפיתול". קיבלנו מערכת עם "אלסטיות בכיפוף" ו"אלסטיות בפיתול". כיצד מתקבלת התכונה "קשיחות בגזירה".

מצב קיצוני יותר של פיתול יתקבל אם המשטח העליון מחולק לשני חלקים, חלק  $A$  וחלק  $B$ . נניח שחלק  $A$  נע בניצב לשורות, דהיינו בכיוון ציר  $Y$  בעוד חלק  $B$  נח במקומו. מצב כזה של תנועה יחסית בין שני חלקים נקרא "גזירה". במקרה כזה יסתובבו רק הגרגרים שמתחת לחלק  $A$ . לעומתם הגרגרים שמתחת לחלק  $B$  לא יתגלגלו. לכן הגרגרים המחוברים ביניהם מתחת לקו המפריד בין שני החלקים יתפתלו. הפיתול יעבור חלקית לגרגרים המקושרים מידית אתם. אלה יעבירו את הפיתול במידה מופחתת לגרגרים שבהמשך וכן הלאה. נקבל מצב של פיתול הדרגתי לאורך שורת הגרגרים אשר יגביר את כוח ההתנגדות להמשך התנועה של חלק  $A$  ביחס לחלק  $B$ . כלומר קיבלנו את התכונה "**קשיחות בגזירה**". אנו נוכחים שלמעשה התכונה "קשיחות בגזירה" קשורה בעקיפין לשתי התכונות האחרות "אלסטיות בכיפוף" ו"אלסטיות בפיתול". כיצד כל זה מתקשר עם "שימור חום". כדי לענות על כך עלינו להבין את מבנהו של הגרגיר.

כאמור, כל גרגיר מתפחס באזורים המצויים במגע עם שני המשטחים. כאשר המשטחים בתנועה יחסית מתגלגל הגרגיר ואזורים אחרים על שפתו באים במגע עם המשטחים. אמנם הגרגיר מקטין את החיכוך בין שני המשטחים אך הוא עצמו, בנקודות המגע יוצר חיכוך מסוים עם המשטחים. חיכוך זה משמעו שהחלק של הגרגיר אשר במגע עם המשטח מקבל תזוזה קטנה בכיוון משיקי. תנועות אלו, כאשר הן חוזרות על עצמן הרבה, במהלך הסיבובים הרבים, עלולות לשחוק את הגרעין במהירות. כדי למנוע זאת גם הגרעין עצמו צריך להיות בעל "**קשיחות לגזירה**". כדי להשיג את התכונה הזאת רצוי שבתוך קליפת הגרעין ימצא גלעין נוקשה במקצת המקושר אל הקליפה באמצעות סיבים זעירים, ממש כמו שהגלעין של פרי השזיף למשל מקושר אל קליפת הפרי באמצעות סיבים. (חסידי תורת "הכאוס" וודאי ישמחו לאפשרות קיומה של עוד דוגמא של תבנית זעירה - הגרגיר שלנו - הדומה לתבנית גדולה - פרי השזיף). עתה כל תנועה קטנה של קטע מהקליפה החיצונית של הגרגיר יתקל בהתנגדות על ידי הסיבים הפנימיים המחוברים לגלעין. תכונת אלסטיות בפיתול חיונית לגלעין שכן כל תנועה משיקה של קטע בקליפת הגרגיר מאלץ למעשה את הקטע המקושר אליו בגלעין להתפתל המקצת. נניח עתה שהן הקליפה של הגרעין והן התוכן הפנימי הם חסרי צבע כשלעצמם. אנו יודעים שהגרעין עצמו מחזיר צבע צהוב. כלומר שהצבעים אדום-שקיעה וכחול-שמיים נבלעים בגרעין. חיפשתי מנגנון תאורטי שעשוי להסביר לכידת קרני האור הללו, מבלי להזדקק לדין במעברים בין רמות האנרגיה של האלקטרונים. מאחר ומדובר בגרגרים בצורה סגלגלה אני מציע לבדוק (אם עדיין לא נבדק) את האפשרות שקרני האור הכחולים נלכדים בתוך הגלעין על ידי החזרות בלתי פוסקות מהדפנות הפנימיות שלו. וכמו כן קרני האור האדומות נלכדות בגרגיר על ידי החזרות בלתי פוסקות מהדפנות הפנימיות של קליפת הגרגיר. יש להניח שהחזרות בלתי פוסקות אלו אפשריות רק כאשר יש התאמה מסוימת בין אורך הגל לבין הצורה התלת ממדית של הדפנות הפנימיות. כל עוד צורת הגלעין סגלגלה במידה המתאימה תמשיך הקרן הכחולה לרוץ בתוכה בין הדפנות. אך אם יחול שינוי מסוים בצורת הגלעין תצא הקרן החוצה (כי זווית הפגיעה תהיה מתחת לזווית הקריטית להחזרה מלאה). אותו מנגנון עשוי להסביר את הבליעה של הקרניים האדומות. כלומר מצאתי מנגנון המאפשר לקלוט אנרגיה לזמן רב ולשחרר אותה במצבים מיוחדים. מצב מיוחד כזה עשוי להיות כאשר הקור הסביבתי גובר והצורה הסגלגלה מתכווצת על ידי פיתול. זוהי תכונתו של צבע כחול-שמיים. שחרור הקרניים האדומות ניתן להסביר כשינוי במידת הכיפוף של הקליפה. לא מן הנמנע שגם קרינה אינפרא אדומה תלכד על ידי החזרות בי הדפנות

הפנימיים של קליפת הגרגיר ותשוחרר בתנאים מתאימים. קרינה אינפרא-אדומה קשורה גם בחום הנובע מתנדודות אטומים. לכן אם גוף חם מצוי במגע עם הגרגיר עשויה קרינה אינפרא אדומה לעבור מהגוף החם אל הגרגיר.

לסיכומו של סעיף זה, נוכחנו שניתן לפתח תאורטית מנגנון שילכוד חום עד שיווצרו תנאים אשר יגרמו לשחרור החום. כלומר יש כאן תכונת "שימור חום". נוכחנו גם שהגרגרים הללו מסבירים את תכונת "הנוקשות בגזירה". הצבע הצהוב עשוי להתקבל הן כאשר הכחול-שמייים והאדום-שקיעה נבלעים ולכן, מבין הצבעים הנראים מוחזר רק הצהוב-שמש. נוכחנו גם שבתנאים מסוימים עשויה להפלט חזרה קרינה בצבע כחול-שמייים. באותם תנאים ו/או בתנאים אחרים, עשויה להפלט קרינה אדום-שקיעה כל זאת בתוספת להחזרת "צהוב שמש".

### לבן-ענני קיץ:

**התאמת תוספת תכונות פיסיקליות: תכונה מכנית: "אלסטיות לתוספת מעיכה". תכונה חומנית: "בידוד מעודף קור".**

**הקשר בין התכונות:** כאמור, הקור מתבטא במערבולות. כאשר מערבולת נתקלת במשטח ללא תבנית מוגדרת היא נשברת ומתפזרת. משטח ללא תבנית מוגדרת מחזיר את כל הצבעים ולכן הוא לבן. תוך כדי פגיעת המערבולת במשטח יש מעיכה מסוימת. אם המשטח אלסטי למעיכה הוא חוזר למצבו שלפני פגיעת המערבולת ומוכן לספוג את המערבולת הבאה. אם המשטח אינו אלסטי אזי פגיעות חוזרות של מערבולות באותו אזור יגרמו לנזק למשטח, כמו שטיפות מים היורדות בהתמדה על סלע יוצרות בו חור. לכן האלסטיות של המשטח בפני מערבולות (קור) משמרת אותו. למשל, פרווה לבנה היא בדרך כלל יותר רכה מאשר פרווה שחורה. כלומר גם הסיבים שלה פחות קשיחים וגם יש יותר אויר בין סיביה. נניח שרוח רוח קרה, המתבטאת בהרבה מערבולות אויר קטנות ומהירות, פוגעת בפרווה הלבנה. המערבולות ישברו והפרווה תשמור על צורתה. למערבולת יש אנרגיה האצורה בה. שבירת המערבולת בתוך הפרווה הלבנה גורמת לדעתי לכך שאנרגית הקור הצבורה במערבולת תהפך לאנרגיית חום המתבטאת בפיזור. כלומר, לא רק שהפרווה הלבנה בולמת את חדירת הקור פנימה לגוף, ולכן היא מבודדת את הגוף מקור, אלא היא אפילו תורמת לתוספת חום כאשר רוחות נשברות בה. דבר זה עשוי להשמע תחילה כחסר בסיס הגיוני בטבע. אולם, התבוננות ממושכת בבעלי חיים מראה שבעלי חיים עם פרוות לבנות או נוצות לבנות נהנים מהרוח ומהקור ואינם מחפשים מקום מסתור בפניהם. לדוגמא מחיי העיר: ניתן לראות לא פעם שדווקא כאשר יש רוחות חזקות עולות יונים רבות המצויות בעיר למקומות הפתוחים לרוח החזקה, כגון ראשי גגות, עמודי טלויזיה וכו'. גם בסרט הנהדר "ציפורים נודדות" ניתן לראות עופות לבנים, דומני שהיו אלה ברווזים לבנים, כאשר הן נהנות במהלכה של סופת שלגים העוברת עליה. סביר שגם דובים לבנים אוהבים סופות שלג ורוחות קרות, אחרת הם היו נכחדים באזורי הקוטב.

לאור מה שהובהר לעיל, ביחס למערבולות בתווכים שונים, כגון אויר, נוזלים, רקמות וכו', אני סבור שגם במפגשים בין מערבולות בתווכים אחרים לבין משטח בעל צפיפות גבוהה יותר, יתקיימו אותן תופעות. זאת עובדה שצבע לבן מופיע בבעלי חיים רבים המצויים באזורים קרים. תכונת "בידוד קור" הקשורה לצבע הלבן נראית כמתבקשת מאליה. לקח לי זמן רב לעמוד על כך שהצבע הלבן קשור לתכונה המכנית אלסטיות במעיכה. מה שהצביע אצלי לראשונה על תכונה מכנית זאת היה החלבון הלבן של ביצה קשה. כאשר משווים את תכונותיו המכניות לאלו של החלבון הצהוב-כתום ניתן להיווכח עד כמה החלבון הלבן אלסטי למעיכה.

### שחור-לילה:

**התאמת תוספת תכונות פיסיקליות: תכונה מכנית: "קשיחות לתוספת מתיחה". תכונה חומנית: "בידוד מעודף חום".**

**הקשר:** הצבע השחור בחי ובצומח נובע בדרך כלל בשל קיומם של מלנופוריים, אלה תאים המכילים גבישי מלנין. גבישי המלנין עצמם הם שקופים וזעירים מאד. אך כאשר הם מסודרים בשכבות רבות בעלות מרווחים משתנים נבלעים בין השכבות כל אורכי הגל בתחום הנראה ואולי גם בתחומים הלא נראים. לכן אורכי הגל הללו אינם עוברים פנימה אל מתחת לתא המלנין ובכך נמנע חימום של התאים הפנימיים על ידי קרינות אלו. כך מושגת התכונה "בידוד חום". כפי שהסברתי במאמר שלי "הפיסיקה של עור הזיקית וצבעיו" מנובמבר 2001, יש בין גבישי המלנין משיכה הדדית. לכן כל נסיון למתוח את התא נתקל בהתנגדות. תאי המלנין מחוברים לרקמות החיות באמצעות סיבים מיוחדים. ככל שיש יותר תאי מלנין, כלומר ככל שיש יותר שחור, עולה ההתנגדות של הרקמה למתיחה. מכאן התכונה "קשיחות במתיחה".

### **שקוף+אולטרה-סגול (שקוף-מבריק)**

**התאמת תוספת תכונות פיסיקליות: תכונה מכנית:** אלסטיות לתוספת מתיחה. **תכונה חומנית:** שימור עודף קור.

**הקשר בין התכונות:** נניח שיש בידינו שריג מלבני ארוך הניתן למתיחה בכיוון הצלע הארוכה של המלבן. נניח שבמצב המנוחה מחזיר השריג צבע סגול. נוכל להיחס אליו כאל גביש סגול. כידוע, על פי נוסחת ברג, אורך הגל של הצבע המוחזר על ידי השריג פרופורציוני למרווח d בין שכבות המולקולות היוצרות את השריג. עבור אותה זווית החזרה, ככל שהמרווח קטן יותר כן קטן אורך הגל. אם נמתח את השריג שלנו יקטן המרווח ויחזר אורך גל קטן מזה של סגול, דהינו אולטרה סגול. נניח עתה שהיינו מתחילים את הניסוי עם גביש שקוף המעביר את כל הקרניים הנראות אך מחזיר אולטרה סגול באורך גל מסוים. מתיחת הגביש עתה תביא להחזרת אולטרה סגול באורך גל קצר יותר. כאשר קרינת אולטרה סגול פוגעת במשטח חלק אנו רואים משטח מבריק. הסיבה לכך היא שהפוטונים של הקרינה האולטרה סגולה נקלטים על ידי החומר במשטח, מעוררים אלקטרונים לרמות אנרגיה גבוהות ובדרכם חזרה לרמת היסוד הם קופצים בצורה הדרגתית תוך כדי פליטת פוטונים פחות אנרגטיים, כלומר כאלה בעלי אורכי גל ארוכים יותר מאשר האולטרה סגול. כך קורה שיש הגברה של פליטת פוטונים של הצבעים הנראים לנו - דבר המתבטא בברק של הצבעים הללו.

אנו רואים אם כן את הקשר בין אולטרה סגול לבין הצבע המבריק. למשל, אדום מבריק פירושו אדום-שקיעה פלוס אולטרה סגול. אנו רואים גם שהמתיחה גורמת לתוספת ברק. כאשר משטח ביולוגי נמתח באמצעות כוחות משיכה הפועל על קצותיו, רצוי שעם הפסקת הכוח ישוב המשטח למצבו המקורי. אחרת המשטח הביולוגי עשוי לאבד את יעילותו לשמש בתפקוד הביולוגי לו הוא נועד. מכאן הצורך באלסטיות. לכן יש הגיון מסוים בהתאמה שעשיתי בטבלה בין שקוף+אולטרה סגול לבין התכונה המכנית "אלסטיות לתוספת מתיחה". ומה הקשר של תכונה זאת עם התכונה המכנית "שימור עודף קור". קור הוא כאמור, מערבולות. מערבולות על פני המשטח מגדילות את צפיפות האויר על פני המשטח, ופירוש הדבר תוספת קור על פני המשטח. המשטח לכן המשטח עשוי להתכווץ הכיוון אנכי למשטח. במקרה כזה המרווח בין השכבות יקטן ואתו יקטן גם אורך הגל האולטרה סגול המוחזר. דבר שכאמור יגביר את עוצמת הברק של צבעים מסוימים. כל עוד המשטח מחזיר אורך גל כזה הוא במצב מכווץ, דהינו במצב שתואר לעיל כנובע מקור. כלומר יש כאן תופעה של שימור קור הקשור ל"צבע" אולטרה סגול. מכאן אנו מקבלים את התכונה החומנית "שימור עודף קור" אשר הותאמה בטבלה ל"צבע" שקוף+אולטרה סגול.

### **עכור + אינפרא-אדום (עכור-מט)**

**התאמת תוספת תכונות פיסיקליות: תכונה מכנית:** "קשיחות לתוספת מעיכה". **תכונה חומנית:** "קרינת עודף חום".

**הקשר בין התכונות:** קשיחות למעיכה של גוף בטבע נובעת בדרך כלל ממבנה גבישי, או קבוצת גבישים, כאשר הקשרים בין מולקולות, או אטומי הגביש הם קשרים חזקים הדורשים אנרגיה רבה כדי להביא לשינוי צורת הגביש, או קבוצת הגבישים המחוברים ביניהם בקשרים חזקים דיים. במקרים כאלה יהיה נכון לתת תכונה מכנית "קשיחות לתוספת מעיכה". אחת התופעות הקשורות במונח הפיסיקלי "חום" קשורה להגברת קצב התנדודות של האלקטרונים באטומי הגביש ובגרעיני האטומים עצמם. דרגה נוספת הן תנדודות של מולקולות שלמות. כאשר גוף קשיח מתחמם גוברות התנדודות של האלקטרונים, האטומים והמולקולות. כידוע בפיסיקה אטומית, כל גוף המעורר לאנרגיות גבוהות (מסלולי אלקטרונים אנרגטיים יותר, או תנדודות מהירות יותר של האטומים ו/או המולקולות) שואף לחזור למצב היסוד שלו על ידי קרינת אורכי גל המתאימים להפרשי האנרגיות. כאשר הגוף שב למצבו המקורי פירושו של דבר שהגוף הקרין לסביבה את החום שהיה אצור בו. ערור אלקטרונים חיצוניים של קליפות האטומים מביא לקרינת אורכי גל בתחום אינפרא-אדום קרוב. דהינו בין 700 נ"מ (ננו מטר = 0.000000001 מ') (קצה אדום נראה) לבין כ- 1200 נ"מ. ערור אטומים ומולקולות גורר קרינה בתחום האינפרא אדום-בינוני, עד 15,000 נ"מ, והאינפרא אדום הרחוק (עד 1 מ"מ). (ראה באנציקלופדיה העברית ערך "ספקטרום וספקטרוסקופיה". לטווחים יותר מדויקים ראה בספרות המקצועית). מכאן ההתאמות שלי של התכונות "קשיחות לתוספת מעיכה" ו"קרינת עודף חום" לצבע עכור-אינפרא אדום, אשר הוגדר בפרק ב.

עד כאן דננו בקשרים בין התכונות הפיסיקליות המותאמות לכל צבע בסיסי שהוגדר בפרק ב'. בפרקים הבאים נביא דוגמאות בולטות מהטבע החי, הצומח והדומם המבהירות מדוע בחרתי דווקא בהתאמות המסוימות הללו.

## **פרק ד' דוגמאות מהחי לכחול**

### **כחול-שמיים**

**דוגמאות בולטות מהחי לתכונות הפיסיקליות המותאמות לצבע כחול-שמיים, "אלסטיות לתוספת פיתול" ו"התכווצות בעודף קור".**

#### **(א) יונקים ימיים:**

לכל היונקים הימיים עור בצבע בסיסי שחור המותאם לתכונה "קשיחות לתוספת מתיחה" ו"בידוד חום". אך ניתן לראות תוספת של כחול-שמיים ביונקים ימיים הנאלצים לעבור באופן חד ממים חמים למים קרים. למשל **הלוויתן הכחול** העובר בין מי-אוקיינוס בטמפרטורה נוחה למים הקרים באזורים הצפוניים. הקור משפיע על כיווץ שכבת השומן שלו. שכבת שומן עבה דרושה כדי לעמוד בלחצים העצומים בעומק רב. אם העור לא יתכווץ במידה המתאימה להתכווצות השומן הוא יהיה מדולדל ויגדיל את החיכוך עם המים. דבר זה יקשה על הלוויתן לשחות במהירות הדרושה. לכן דרושה לעור הלוויתן הזה תוספת התכונה החומנית "התכווצות בעודף קור". לא פחות מכך חשובה התכונה "אלסטיות לתוספת פיתול". סביר שהעור של הלוויתן הכחול מתכווץ בשיטת הפיתול המקומי ולא בשיטת האקורדיון הסגור. כיווץ בשיטת האקורדיון צגרום לכך שעורו יהיה בצורת גלים עולים ויורדים. הדבר יגביר את החיכוך עם המים ויפריע לתנועה החלקה. מכאן הצורך בכיווץ על ידי פיתול. ולשם מה תכונת האלסטיות (לפיתול). אם לא תהיה אלסטיות לפיתול, אזי כאשר אותו לוויתן כחול ישוב מהמים הקרים למים בטמפרטורה הנוחה ישאר עורו מכווץ. הדבר יקשה כמובן על התפשטות שכבת השומן, או שהעור יתבקע. את האפשרות האחרונה הזאת הטבע מנסה למנוע ככל הניתן. לכן האלסטיות בפיתול.

על פי השרטוטים בספר The Encyclopedia of Natural History, Editor J. Pope, Octopus Books Ltd. 1978 בנושא יונקים ימיים עמ' 219, ניתן לראות שני סוגים של פרות-ים או **תחשאים** (Sirenia). הם ניזונים מצמחיה ימית ואצות במים רדודים של ימים ונהרות. הסוג האחד, תחש הנהרות (Manatee) (Tichechus) מצוי באזור הטרופי במערב אפריקה, דרום ארה"ב ודרום אמריקה. הוא חי בעיקר בנהרות ולעיתים מגיע לחופי הים. על פי השרטוט צבע החלק העליון שלו הוא בעיקרו חום. הסוג השני **תחש-המשכן**

(Dungong dungon) מצוי בעיקר בימים לאורך חופי האוקיינוס ההודי ממדגסקר והים האדום ועד הפיליפינים וצפון אוסטרליה, כלומר באזורים קרים יחסית לסוג הראשון. הצבע של חלקו העליון הוא בעיקרו כחול-שמיים, עם תוספת שחור, כפי שרואים בשרטוט. לשניהם גחון לבן שיוסבר בהמשך. הזנב של תחש הנהרות בצורת את חפירה יחיד. בעוד שהזנב של תחש-המשכן מפוצל בדומה לזנב לויתן. זנב מפוצל מצביע על דינמיות גדולה יותר ובעיקר כושר סבסוב סביב ציר האורך של הגוף. ראה למשל זנב ציפור סנונית וכישוריה הלולייניים. גם אצל דולפין יש זנב מפוצל. כולנו נהנים לראות את הלוייתנים ובעיקר הדולפינים עושים סלטות מחוץ למים בתוספת לסבסוב מדהים. המצאות זנב מפוצל אצל תחש-המשכן מרמז שהוא יותר דינמי ומגיע לעומקים גדולים יותר מאשר תחש הנהרות. גם צורת פיו המיוחדת של תחש-המשכן מצביעה על כך שעליו להתמודד עם צמחיה אשר יותר קשה לעוקרה. וזאת יש בעומקים גדולים יותר. כל זאת מלמדנו שעל תחש-המשכן לעבור לעיתים קרובות ממים בטמפרטורה נוחה בקרבת החוף למים קרים בעומק הים. המעברים הללו למים קרים מצריכים כיווץ העור אצל התחש-משכן. זאת מאותה סיבה שאצל הלוייתן הכחול-שמיים. לכן תכונת ההתכווצות בקור חשובה לתחש המשכן. מכאן התוספת של צבע כחול-שמיים בחלקו העליון. לא פחות מכך חשובה התכונה "אלסטיות לתוספת פיתול" כדי להשאיר את עורו של תחש-המשכן מתוח בכל המצבים, כפי שהוסבר לגבי הלוייתן הכחול.

יונק ימי נוסף בעל תוספת של כחול-שמיים לעורו הוא **כלב הים** (Seal). כלבי ים אמיתיים חיים על החוף או סלעים באזורי מים קרים. הקפיצות התכופות מהחוף בעל הטמפרטורה הנוחה עבורם למים הקרים מאד, ובחזרה, מחייבים את העור להיות בעל אותן תכונות המקושרות אצלנו לצבע כחול-שמיים, דהינו "התכווצות לעודף קור" ו"אלסטיות לתוספת פיתול".

#### ב) בעלי חיים יבשתיים

בין בעלי החיים היבשתיים אשר בהם בולטת תוספת של כחול-שמיים אזכיר את **הפינגוין ה... ,** גם אצל הפינגוין יש כניסות תכופות מהחוף בעל הטמפרטורה הניחה עבורו אל תוך המים הקרים מאד.

**לשועל השלג** (Alopex lagopus) יש שני זנים בעלי מופעי צבעים שונים. בזן אחד המופע הוא חום בקיץ ולבן בחורף. בזן השני המופע הוא כחול-כהה בקיץ וכחול-בהיר בחורף. לשועל השלג יכול להתקיים בקור עד מינוס 80 מעלות צלזיוס. הוא שוכן במקומות סלעיים. תזונתו: מכרסמים, שיירים של הדוב הלבן, נבלות של לוייתנים וכו'. הוא אוגר מזון אך אינו נכנס לתנומת חורף. תפוצתו: מסביב לציר הקוטב צפוני. פרוותו רכה מאד. לאור התיאור הזה הלקוח מהאנציקלופדיה העברית ערך "שועל", ולאור ההסברים הנ"ל לגבי הצבע כחול-שמיים, קל להבין את הקשר בין תוספת הצבע כחול-שמיים לבין הצורך של השועל לעבור ממקומות חמימים יחסית, במערות הסלעים אל המקומות המקפאים מחוץ למערות. תוספת הצבע הלבן בחורף באה להוסיף בידוד בפני קור, כפי שרואים בטבלה לעיל וכפי שאסביר בהמשך.

בפניו של קוף **מנדרייל ענק** (Mandrillus sphinx) הזכר הבוגר יש חריצים אשר ניכר בהם תוספת של הצבעים כחול-שמיים וארגמן. הוא שוכן קרקע וחי ביערות עבותים. בלילות הוא ישן על העצים. (ראה אנצ' עברית ערך קופים עמ' 459). ניתן לראות אותו בספארי ברמת גן. החלק הקדמי של פניו מוארך מאד אפילו ביחס לקופים מסוגים אחרים. ההסבר לתוספת של כחול-שמיים ברור לי כאשר מתייחסים לתכונות הפיסיקליות המותאמות לצבע זה: "אלסטיות לתוספת פיתול" ו"התכווצות בעודף קור". כידוע, לפרימאטים (קופים ובני אדם) יש יכולת מיוחדת להזיז את שרירי הפנים (מימיקה). אנו למשל מכווצים את שריר פנינו כאשר כואב לנו ומרחיבים אותם כאשר אנו שמחים. גם במנדרייל הענק קיימת אותה יכולת. אך בשל צורת פניו המוארכת יש צורך במנגנון מיוחד להרחבת וכיווץ. אני מכיר שתי שיטות עיקריות לכיווץ שטח. כיפוף ופיתול. אנו מכווצים את הפנים על ידי קימוט, או כיפוף חלקים שונים. החריצים בעורו של המנדרייל הענק מרמזים על שימוש בשתי השיטות יחד. הצבע כחול-שמיים מרמז על שיטת הפיתול. צבע הארגמן, כלומר המכיל אדום-שקיעה, מרמז על שיטת הכיפוף. האלסטיות לפיתול דרושה כמובן כדי להחזיר את המצב לקדמותו לאחר הפיתול. כאשר קר פניו של המנדרייל יתכווצו יותר, כפי שאצלנו, אך אצלו יבוא הדבר לידי ביטוי בפיתול. כלומר גם התכונה של כחול-שמיים "התכווצות בעודף קור" אצל המנדרייל ניתנת להסבר. כאשר חם פניו יתפשטו כנראה יותר מפניו שלנו, ולכן התכונה "התפשטות בחום" הקשורה לאדום-שקיעה, ניתנת להסבר בצבע הארגמני של חריצי פניו.

מהתבוננות בתינוק של המנדרייל בספארי נוכחתי שאצלו אין צבע כחול-שמיים אלא רק ארגמני. אך אצלו הפנים עדיין אינן מוארכות במידה בולטת ולכן כנראה אין לו צורך בשימוש בשיטת הפיתול.

בהזדמנות זאת הייתי מבקש להסביר את השקפתי לגבי תפקיד המימיקה של הפנים אצל הפרימטים (קופים ובני אדם). כידוע לפרימטים שטח הפנים של המוח חיצוני גדול יחסית בהרבה מאשר אצל בעלי חיים אחרים. פעילות המוח צורכת דם רב. הגדלת שטח הפנים מחייבת זמינות רבה יותר של דם. להערכתי, שרירי הפנים מהווים מחסן דם זמין וקרוב עבור המוח. כאשר כואב לנו באזור מסוים בגוף מתבטא הדבר בהגברת הלחץ על האזור המתאים במוח והגברת פעילותו של אותו אזור. כיווץ הפנים מאפשר את אספקת הדם המיידית. כאשר אנו שמחים מתבטא הדבר בהקטנת הלחצים במוח, כלומר הקטנת הפעילות וצריכת הדם. עודף הדם אינו יכול לחזור למערכת הדם דרך הורידים כי להם מגבלות משלהם. מה גם שאם אכן היה הדם חוזר לגוף דרך הוורידים היה עשוי לעבור זמן רב עד שהוא היה חוזר למוח בעת מצוקה. לכן עודף הדם עובר לשרירי הפנים. אני משער שהעוויות השונות שאנו עושים בפנים (מימיקה) במצבי רוח שונים מבטאות למעשה מצבים של הזרמת דם למוח מחלקים שונים של הפנים לחלקים שונים של המוח. אני מציע לבדוק את הנושא במחקר מעמיק. בהזדמנות זאת אני רוצה לציין שאם אכן אני צודק בהשקפתי זאת הרי שהפנים מהוות מעין רדיאטור למוח. כאשר חם לנו ואנו שוטפים את הפנים אנו בעקיפין מצננים במקצת את הדם הזורם למוח. המוח, כמו מכשירים טכנולוגיים רבים, עובד טוב יותר בסביבה קרה יחסית מאשר בסביבה חמה מדי. לכן מניסיוני, שטיפת הפנים לפני מבחן או פגישה חשובה עוזרת.

כל זאת עשוי להסביר מדוע זקוק אפילו הקוף מנדרייל ענק לכיווץ פניו למרות שמבנה החלק הקדמי של הגולגולת מוארך מאד ומקשה על קיפולים פשוטים של שרירי הפנים יחד עם העור שמעליהם. בלית ברירה מצא הטבע את הפתרון של פיתולים בפניו של אותו קוף עם החריצים המיוחדים. תוספת הצבע כחול-שמיים בחריצים אלה אצל הבוגר מצביעה על התוספת של התכונה "אלסטיות לתוספת פיתול".

#### ג) דו-חיים ולטאות

בין הדו-חיים בעלי תוספת ברורה של כחול-שמיים ראוי להזכיר את הזכר של **טריטון האלפים** (Triton alpestris) ראה תמונה צבעונית באנציקלופדיה עברית כרך י"ב הין עמודים 120-121. גם אצלו יש להניח שדרושים מעברים תכופים בין המקומות החמים יחסית מחוץ למים לבין המים הקרים באזורים קרים. הנקבה חומה בעיקרה והדבר מצביע על כך כי היא נכנסת למים פחות מאשר הזכר.

התכונות הללו הקשורות לצבע כחול-שמיים עשויות להסביר לי סוף סוף את הצבע כחול-שמיים המתווסף לחלק הקדמי של גוף הזכר של **חרדון סיני** בעונת הרבייה ולראשה של הנקבה בעונה זאת. הצבע כחול-שמיים הזה מרמז לי שהזכר יוצא ונכנס בעונת הרבייה ביתר תכיפות אל מקומות המסתור הסלעיים במדבר המוצלים והקרירים. כמדומה, במשך מרבית שעות היום עומדים חרדוני סיני במרומי סלעים במדבר וממתינים למזון מזדמן. צבעם הרגיל אפור לבן. אך בתקופת הרבייה יש שינוי ניכר בצבע. מעניין שלחלק הקדמי של הזכר מתווסף צבע כחול-שמיים גם כאשר הוא נתקל בזכר אחר המנסה לפלוש לנחלתו. צבע זה נתפס כיום כצבע אזהרה. אם הזכר השני אינו נבהל מתווסף גם אצלו הצבע הכחול-שמיים והם מתחילים במאבק. אך עם תחילת המאבק חוזר עורם לצבעו המקורי, אפור. (ראה "מדריך הזוחלים בישראל" של פנחס אמיתי בהוצאת כתר). ההסבר הפיסיקלי שאני מציע לתוספת הכחול-שמיים אצל חרדון סיני היא שהן במהלך תקופת הרבייה והן לקראת הקרב בין הזכרים ההתרגשות גדולה. ההתרגשות גדולה פירושה שהמוח צורך כמות גדולה של דם ובמהירות. כיווץ העור בחלק הקדמי של הגוף, למשל על ידי פיתולים בעור, עשוי לאפשר את הזרמת הדם המהירה. התכווצות של חלקי גוף שונים בשעת סכנה והתרגשות רואים אצל בעלי חיים רבים. החתול מתקמר ושערותיו מסתמרות. אצלנו עור המצח מתכווץ בריכוז רב. אני מציע את האפשרות שאצל כל בעלי החיים יש צורך דומה באספקת דם מהירה למוח במצבים מיוחדים וכל בעל חיים מוצא את הפתרון המתאים לו. פיתולי העור אצל חרדון סיני דורשים את התכונה המכנית "אלסטיות לתוספת פיתול". הכניסות התכופות למקומות הקרירים דורשים את התכונה החומנית "התכווצות בעודף קור". שתי תכונות אלו מותאמות אצלי לצבע כחול-שמיים. תוספת הצבע כחול-שמיים בעורפה של הנקבה של חרדון סיני מתקשר, על פי "אנציקלופדיית החי והצומח של ארץ ישראל" עם נסיונותיה של הנקבה

להרחיק את הזכר הטרדן באמצעות דחיפות בראשה. דחיפות כאלו עשויות לגרום לפיתולי העור. הצורך למתוח חזרה את העור לאחר התרחקות הזכר מצדיקה את תכונת האלסטיות. אולי זה נותן הסבר (דחוק במקצת) לתוספת הצבע כחול-שמייים בעורפה של הנקבה. דרושה חקירה מדעית מעמיקה כדי לאשר את השערתך או להפריכה ולמצוא נימוק **פיסיקלי** אחר לקיומו של צבע זה.

#### ד) ציפורים:

מבין למעלה מ-700 שרטוטים של ציפורים המופיעים בספר "הציפורים- מגדיר שדה שלם לציפורי אירופה והמזרח התיכון", ה. הינצל, ר. פיטר וי. פרסלאו, הוצאת הקיבוץ המאוחד 1975, יש רק כמה ציפורים בודדות אשר להן יש תוספת של צבע כחול-שמייים. הדוגמא הבולטת ביותר היא **צוקית בודדת** (*Monticola solitarius*) בעמ' 243. לזכר תוספת צבע כחול-שמייים בכל הגוף, אפילו בגחונו ולא רק בראשו. לידו באותו עמ' יש שרטוט של צוקית חכלילית (*Monticola saxatilis*) כאשר בראשו של הזכר תוספת של כחול-שמייים אך גחונו בצבע חום חלודי. ההבדלים בין בתי הגידול של שניהם עשויים לרמוז על הסיבה להבדלים אלו. בית הגידול של צוקית בודדת הוא נופים סלעיים מפסגות ההרים ועד לפני הים. לעומתו, בית הגידול של צוקית חכלילית הוא נוף סלעי פתוח ובין חורבות. כלומר הצוקית הבודדת מצויה באזורים בעלי רוחות קרות יותר. יציאותיו התכופות של הזכר לחיפוש מזון עבור המשפחה מחייבות אותו כנראה לעבור ממקומות בעלי טמפרטורה נוחה עבורו בחגבי הסלעים למקומות הפתוחים הקרים. המעברים התכופים אל הקור מחייבים פתרונות פיסיקליים מתאימים. התכונות הפסיקליות הקשורות בטבלה הנ"ל עם צבע כחול-שמייים מספקות את הפתרונות הנדרשים. תכונות אלו הם "התכווצות בעודף קור" ו"אלסטיות לתוספת פיתול".

דוגמא מובהקת נוספת הוא **שלדג הגמדי** (*Alcedo atthis*). בגבו וקרקפת ראשו יש תוספת של כחול-שמייים. גחונו חום חלודי. הוא נוהג לעמוד על ענף או אפילו לרחף באויר מעל אגמים או נהרות של מים מתוקים, וצולל למים כדי לתפוס דגים. הוא אינו יודע לשחות. לכן עליו לצאת מייד מהמים לנקודת התצפית. כניסותיו התכופות למים מהווה מעברים תכופים מטמפרטורה נוחה לקור. העובדה שרק בגבו וקרקפתו יש תוספת כחול-שמייים עשויה לרמוז על כך שהוא צולל למים בזווית הגורמת לגב לספוג את עיקר המכה. יש בכך הגיון שכן הגחון רגיש יותר למכות. יציאתו המיידית מהמים מרמזת שאכן כך הדבר. לעומתו שלדג-לבן-חזה (*Halcyon smyrnensis*) צד גם במקומות רחוקים ממקורות מים. הוא צד גם דו חיים וזוחלים הנלכדים בצניחה (ראה אנצ' עברית ערך "שלדגים"). כלומר אין עליו לבצע צלילות עמוקות. צבע ראשו חום ובגבו יש רק מעט תוספת של כחול-שמייים. גחונו לבן ומכאן שמו. גם בזנבו יש תוספת של כחול-שמייים כמו זנבו של השלדג הגמדי. הצבע כחול-שמייים בזנב עשוי לרמז על צורך בפיתול הזנב לעיתים תכופות, כנראה תוך כדי הצלילה באויר כלפי מטה. פיתול הזנב בצלילה עשוי להביא לסבסוב של הגוף סביב האורך של הציפור, דבר המקנה יציבות בהתבייתות על המטרה. זאת בדומה למשל לכדור רובה המקבל סבסוב לצורך יציבות.

דוגמא מעניינת נוספת היא **העורבני** (*Garrulus glandarius*) עמ' 305. במשך שנים עקבתי אחרי התנהגותו במטרה להבין מדוע דווקא לו יש פסים עם תוספת צבע כחול-שמייים בחלק הקדמי של הכנפיים בעוד שלעורב האפור (*Corvus corone cornix*) אין פסים כאלה. לבסוף מצאתי סיבה הגיונית לדעתי. העורב האפור נוהג ללקט את מזונו בעיקר בצמרות העצים. ואילו העורבני מלקט את מזונו בעיקר בענפים התחתונים של העצים. ניתן לראות זאת למשל בסביבה של עצי פקן, עצי בלוט (אלונים) ועוד. כדי להגיע לענפים התחתונים מבצע העורבני תמרון שלא היה מבייש אפילו מטוס קרב. הוא עף בצורה מאוזנת עד שהוא מגיע אל מתחת לענף הרצוי לו ואז הוא מבצע תפנית חדה כלפי מעלה ומתישב על הענף. תפנית כזאת מתאפשרת להערכתך על ידי פיתולים של הנוצות בחלקים הקדמיים של הכנפים. מערבולות האויר המיוחדות הנוצרות עקב פיתולים אלה יוצרות כנראה כוח עליוי חד של החלק הקדמי של הכנפיים, דבר הגורם לכל החלק הקדמי של הגוף להסתובב בזווית חדה כלפי מעלה סביב ציר הרוחב (ציר הכנפיים בתעופה) של הציפור. בספרים על מטוסים ניתן לראות שיש מספר מטוסי קרב המשתמשים במדפי כנפיים קדמיות לצורך תמרונים. לא מן הנמנע שגם העורבני מפעיל עקרונות דומים. עד כאן הסברתי את התכונה המכנית "אלסטיות לתוספת פיתול" של הפסים בעלי תוספת צבע

כחול-שמיים בכנפי העורבני. לגבי התכונה החומנית, "התכווצות בעודף קור" אני יכול לשער שהמערבולות הללו, הנוצרות על הנוצות בצבע כחול-שמיים עקב פיתולן, יוצרות סביבה קרה במיוחד סביב הנוצות ולכן דרושה התכווצות של אותן נוציות כדי שהן תתפקדנה כרגיל למרות העליה הקטנה בצפיפות האויר עקב הקור. אם הן לא תתכווצנה במידה הדרושה שטח הפנים שלהן יהיה גדול מדי וידרש מהן יותר כוח כדי לבצע אותם ביצועים שהיו מבצעות אילו לא היתה עלייה בצפיפות.

עוד סוג של ציפור מעניינת עם תוספת של צבע כחול-שמיים היא הזכר של **ברוז איסלנדי** (*Histrionicus histrionicus*), עמ' 63. כאמור שם, הברוז האיסלנדי מצוי בעיקר באיסלנד, דהינו באזורים בהם המים קרים יחסית. הוא מקנן ליד נהרות מהירי זרם, כגון מפלי מים. הוא חורף בים ליד חופים סלעיים. לנקבה ראש וגוף חומים בעיקרם. תוספת הצבע כחול-שמיים על ראשו וצווארו של הזכר מרמזים על כך שהוא מכניס לעיתים תכופות יותר את ראשו וצווארו לתוך המים הקרים. ככל הנראה הוא זה שמבצע את מלאכת חיפוש המזון בעוד הנקבה פחות פעילה בכך ומקדישה יותר לטיפול במשפחה. המעברים התכופים הללו של ראשו וצווארו של הזכר מהטמפרטורה הנוחה לו אל המים הקרים מחייבים כנראה את התכונות המקושרות אצלי כחול-שמיים, "התכווצות בעודף קור" ואלסטיות בתוספת פיתול". ההסברים עשויים להיות כמו ההסברים שלעיל, ולא אחזור עליהם כאן. גם לזכר של "**אדרית מלכותית**" (*Somateria spectabilis*), עמ' 61, יש כתם בעל תוספת צבע כחול-שמיים ברורה על הקרקפת והעורף. זאת לעומת הנקבה שכולה חומה בעיקרה. בית הגידול של אדרית מלכותית הם חופי ים ארקטיים ומקווי מים מתוקים בטונדרה. כלומר בהחלט מים קרים מאד המאפשרים הסבר כנ"ל לצבע כחול-שמיים. מעניין שאצל הזכר של האדרית המלכותית רק הקרקפת והעורף בעלי תוספת כחול-שמיים, בעוד שהמקור והמצח אדומים. על משמעות הצבע האדום נעמוד בהמשך. כאן רק אציין שהתכונה המכנית של אדום "אלסטיות לתוספת כיפוף" נראית טבעית בהחלט כאשר משווים את הבליטה הגדולה של המצח אצל האדרית המלכותית לעומת אדריות אחרות המשורטטות באותו עמ' 61.

#### ה) חרקים

כאשר עברתי על "מדריך החרקים בישראל ופרוקי רגליים אחרים", פ. אמת, הוצאת כתר 1991, במטרה למצוא חרקים בעלי כתמים בצבע כחול-שמיים, ציפיתי למצוא שם הרבה דוגמאות. להפתעתי מצאתי רק כמה בודדות. אני מניח שבארצות קרות ו/או בעלות כמויות רבות של מים, ימצאו הרבה יותר סוגי חרקים בעלי כתמים בצבע כחול-שמיים. הדוגמאות הבולטות שמצאתי אצלנו הן: הזכר של **שפירית סורית** (*Calopteryx syriaca*) (עמ' 53) המצוי בעיקר על צמחים בקרבת מים בצפון הארץ באביב ובקיץ. הגוף המוארך שלו בעל גוון כחול-שמיים מבריק. ניתן להסביר את תוספת הצבע כחול-שמיים בכך שהשפירית הזאת נעה כל העת ממקומות עם טמפרטורות נוחות עבודה, במרחק מה משפת המים, אל מקומות קרירים יותר על הענפים שמעל המים. שוב יש כאן מעברים תכופים בין טמפרטורה נוחה לקור. הצבע כחול-שמיים מרמז על התכונות "התכווצות בעודף קור" ו"אלסטיות לתוספת פיתול". את ההתכווצות בקור קל להסביר שכן גוף כל כך מוארך העובר שינוי טרמי צפוי לעבור שינוי באורך. את האלסטיות ניתן להבין בשל המעברים התכופים אל האזורים הקרים וחזרה. אך לשם מה הפיתול. כאן דרושה חשיבה יצירתית אותה אבצע עתה תוך כדי כתיבה. הגוף עצמו מוארך וחלק. את העובדה שהגוף חלק ניתן ללמוד גם מכך שהגוף מבריק. השפירית ידועה בתכונות האוירודינמיות המעולות שלה. כל חספוס בגוף היה פוגם בתנועה. לכן לא הגיוני שההתכווצות בקור נעשית על ידי כיווץ כדוגמת אקורדיון. אי לכך נשאר הכיווץ תוך כדי פיתול. מעניין יהיה לצלם את השפירית הזאת בתנועה בין הגדה והמים כאשר קצב התמונות גבוה, כך שניתן יהיה לבחון באיזו מידה אכן מתפתלים חלקי בגוף במעבר אל המים. אגב, תנועת הפיתול עשויה לעזור לשפירית באיזון תוך כדי תנועה. גם אם לא מדובר בסיבובים מלאים של הפיתול, יש בהם כדי לתרום ליציבות התנועה. זאת משום שקצה הגוף רחוק מאד יחסית ממרכז הכובד של השפירית, שהוא באזור חיבור כנפיה. לכן כל תנועה בקצה המרוחק של הגוף משפיע מאד על כל התנועה. בהליקופטרים התופעה מוכרת. לכן די בפרופלור קטן בקצה הזנב המרוחק כדי להשפיע משמעותית על תנועת ההליקופטר. השפירית ידועה גם בערך G הגבוה שלה, כלומר ביכולת ביצוע תפנית חדה מאד בזמן קצר מאד. לא מזמן ראיתי בתוכנית טלביזיה כיצד מחקים את כישורי השפירית כדי להכשיר את האסטרונאוטים למצבי G גבוהים. דומני שלאחר הרהורים גלויים אלה קל להשתכנע כי הפיתול אכן דרוש בגוף השפירית.



על פי הטבלה. הברק בגוף המוארך של זכר השפירית הסורית מצביע על קיום "צבע" אולטרא סגול. התכונות הפיסיקליות הקשורות עם אולטרא סגול הן "אלסטיות לתוספת מתיחה" (צמיגות) ו"שימור עודף קור". ניתן למצוא הסברים מדוע שתי תכונות אלו מוסיפות לגוף השפירית הזאת. אני מציין זאת כאן משום שגם לזכר של **שפירית השלפוחיות** (*Epalage fatime*) (עמ' 53) יש גוף כחול אך הוא לא מבריק. הוא כנראה שילוב של כחול-שמיים עם הרבה יותר שחור מאשר אצל השפירית הסורית.. התפוצה שלו היא בבקעת ים המלח ולאורך בקעת הירדן צפונית, באביב ובקיץ. הגיוני ששפירית השלפוחית עוברת תכופות בין מקומות חמים שעל שפת המים לבין מקומות קרירים שליד המים המלוחים או בתוך מים מתוקים המצויים גם הם בבקעת ים המלח (עין גדי בדרום ועין פשחה בצפון ים המלח). העובדה שהגוף אינו מבריק מרמזת שאין צורך לגוף ב"שימור עודף קור" ואין אף צורך ב"אלסטיות לתוספת מתיחה". עיון בתמונות שבמדריך מאפשר להסביר מדוע. נוכחים שמלבד הכחול-שמיים בגוף שפירית השלפוחיות יש גם מעט צבע שחור. לצבע שחור יש תכונה של "קשיחות לתוספת מתיחה" ו"בידוד עודף חום". ואכן הבעיה המרכזית בבקעת ים המלח ובבקעת הירדן היא עודף חום. לכן שם "בידוד עודף חום" עדיף על תכונת "שימור עודף קור". כמו כן, אם יש "קשיחות לתוספת מתיחה" פוחתת סכנת הקריעה עקב מתיחת הגוף ואין צורך ב"אלסטיות לתוספת מתיחה". כלומר תכונת "קשיחות לתוספת מתיחה" עדיפה כאן על תכונת "אלסטיות לתוספת מתיחה".

## פרפרים

בין משפחות הפרפרים הרבות יש רק מעט אשר כל כנפיהן כחולות. אצל זכרים רבים של משפחת הכחיליים (*Lycaenidae*) הצד העליון של הכנף כחול-מבריק. על פי הטבלה שלי, מדובר כנראה בשילוב של כחול-שמיים ואולטרה-סגול. לכחול-שמיים תכונה מכנית "אלסטיות לתוספת פיתול" ולאולטרה-סגול תכונה מכנית "אלסטיות לתוספת מתיחה" (צמיגות). התכונות החומניות שלהם הם: לכחול-שמיים "התכווצות בעודף קור". לאולטרה-סגול "שימור עודף קור". שתי התכונות החומניות הללו מרמזות שהזכרים של משפחת הכחיליים אשר הצד העליון של כנפיהם כחול-מבריק עוברים ממקומות בעלי טמפרטורה נוחה עבורם למקומות קרים יחסית. לדוגמא **כחליל השיטה** (*Azanus ubaldus*). על פי ספרו של יצחק איזנשטיין "על פרפרים וצמחים בארץ ישראל", הוצאת משרד הבטחון, (כנראה מסוף שנות ה'80) הוא נפוץ באיזורים ערבתיים ומדבריים בערב, ירדן ישראל, הודו וסרי-לנקה. בארץ ניזון הזחל מפרחי השיטה הסלילנית (*Acacia raddiana*) ושיטת הנגב (*Acacia gerrardii* ssp. *negevensis*) הדומה לשיטה הסלילנית. השיטה הסלילנית היא עץ מדברי סודני הגדל ברוב מרחבי הנגב, באפיקים ונחלים בערבה ובמדבר. פורח גם בקיץ יוני-נובמבר וגם באביב אפריל-מאי. שיטת הנגב מוגבלת למקומות קרירים יותר מהשיטה הסלילנית ואינה מצויה בערבה. מצויה לאורך ערוצי נחלים דרומית לנחל פארן ומערבה לכביש מצפה רמון-שיזפון בגובה 200-800 מ'. עיקר הפריחה בסתיו (ספטמבר-ינואר). (ראה עמ' 176-178 במדריך העצים והשיחים בישראל", א. שמידע וד. דרום, הוצאת כתר 1992). מוטת כנפיו של הזכר של כחליל השיטה 2-2.2 ס"מ, צידן העליון כחולות-וורודות עם שוליים צרים שחורים (ראה תמונות בעמ' 130-131 בספר של איזנשטיין). הצד התחתון של כנפי הזכר אפור בעיקרו. הנקבה קטנה מהזכר, 1.8 ס"מ (אחת הקטנות ביותר בין הפרפרים בעולם, לפי דברי המחבר). הצד העליון של כנפי הנקבה חום ושורשיהן תכלכל. הצד התחתון דומה לזה של הזכר. הם מעופפים הרבה מסביב לשיטה ומקימים מספר דורות בשנה.

מהתאורים הללו של כחליל השיטה ועצי השיטה אני מסיק שהפרפר **כחליל השיטה** מצוי בעיקרו באזורים חמים ויבשים אך מגיע תכופות לאזורים לחים וקרירים יחסית בערוצי נחלים. יתכן שהזכר מעופף בין עצי שיטה מרוחקים כדי להשיג את הצוף מהפרחים בהם, בעוד הנקבה מצויה בסביבה מצומצמת. אם כך הדבר - אזי מדובר במעברים תכופים בין המקומות החמים שמחוץ לערוצי הנחלים לבין המקומות הקרירים בערוצי הנחלים. צפיפות האויר במקומות כאלו נמוכה יותר מאשר במקומות הפתוחים החמים. כדי לשמור על אותו כושר תעופה צריכה הכנף להתכווץ במעט. לכן תוספת הצבע, כחול-שמיים עונה על הצורך בתכונה הפיסיקלית החומנית "התכווצות בעודף קור". כאמור, הצבע התחתני של כנף הזכר אפור בעיקרו. האפור הוא שילוב של שחור ולבן. התכונה החומנית המותאמת אצלי לצבע שחור היא "בידוד עודף חום". התכונה החומנית המותאמת לצבע לבן היא "בידוד עודף קור". כאשר הפרפר עומד ויונק צוף כנפיו זקופות. זה קורה במהלך היום כאשר קרני השמש לוחטות והאויר חם. תוספת הצבע השחור עוזרת לחלק התחתון של הכנף (הפונה בעמידה אל הסביבה) לבודד את החום. גם בלילה הפרפר נח כאשר כנפיו זקופות. הלילה במדבר קר מאד. תוספת הצבע הלבן

עוזרת לבודד את הקור בלילה. לכן מתקבל הצבע האפור. תופעה זאת של צבע אפור מצויה בחיות מדבריות רבות. מכאן ההסבר הפיסיקלי-חומני לקיומו של צבע אפור בחלק התחתון של כנפי הזכר והנקבה. במהלך היום הנקבה מצויה באזור מצומצם ותוך כדי תנועתה היא נחשפת למידה מסוימת של חום סביבתי. הצבע החום של הצד העליון של כנפיה מרמז שנוסף לכנף צבע אדום המאפשר "התפשטות בתוספת חום". לעומתה הזכר פעיל יותר מבחינת התעופה. נפנופי הכנפיים הנמרצות יוצרים מערבולות אוויר חזקות יחסית על החלק העליון של הכנף. מערבולות אוויר ידועות באווירודינמיקה כגורמות להפחתת הלחץ מעל הכנף ולמעשה נותנות לכנף עילי כלי מעלה. זה למעשה מה שמאפשר לפרפר לעוף למרות הכנף הגדולה יחסית לגוף. כפי שהסברתי במקומות אחרים, מערבולות אוויר פירושן גם קור. לכן בשעת התעופה הנמרצת של הזכר מצוי הצד העליון של כנפיו בתנאים קרים יותר מאשר הצד התחתון. מערבולות אוויר גם גורמות לפיתולים מקומיים במשטח שאתו הן באות במגע. מכאן שהצד העליון לא רק מצוי בטמפרטורה קרה יותר המביאה להתכווצות עקב קור אלא ההתכווצות נעשית באמצעות פיתולים. כאשר הפרפר מפסיק את התעופה צריך החלק המכווץ לחזור למצבו המקורי, אחרת ישאר עיוות שבמהלך הזמן ימנע תעופה יעילה. מכאן הצורך בתכונה המכנית של כחול "אלסטיות לתוספת פיתול". בנוסף לכך, במהלך התעופה עצמה עשויה הכנף העדינה של הפרפר גם להמתח במקצת. לכן נחוצה כאן התכונה המכנית "אלסטיות לתוספת מתיחה" הקשורה אצלי לצבע מבריק-אולטרה סגול. כאשר הפרפר עובר מתעופה נמרצת, שבמהלכה היה הצד העליון בתנאי קור יחסי, למצב של תנועה רגועה, ובכך מצוי הצד העליון בתנאי הסביבה החמה, לא רצוי שהכנף תתפשט בבת אחת. לכן שימור קור כדי לאפשר התפשטות הדרגתית עונה על הצורך הזה. התכונה החומנית של מבריק-אולטרה סגול "שימור עודף קור" נותנת את המענה לצורך זה. בכך יש לנו ניצני רעיונות להסבר הצבע כחול-מבריק בצד העליון של הכנף של כחליל השיטה.

יצויין שבפרפרים רבים הצד העליון מבריק. ההסבר כאן לגבי החשיבות של "אלסטיות לתוספת מתיחה" ו"שימור עודף חום" המותאמים אצלי ל"צבע" מבריק-אולטרה סגול, מסבירים את הברק המיוחד אצל מרבית הפרפרים. קיומן של שתי שכבות בכנפי הפרפרים, שכבה עליונה ושכבה תחתונה, כאשר לכל שכבה יש תכונות פיסיקליות שונות מאפשר גיוון רב בצורות הכנף כולה בתנאים שונים של טמפרטורה, לחות, צפיפות אוויר, רוחות, קרינת שמש ועוד. הדבר נכון לא רק לגבי הכנף בכללה אלא גם לגבי כל חלק וחלק של הכנף. מכאן מובן בעיקרו המגוון העצום של צבעי הפרפרים וקיומם של צבעים שונים בחלקי כנף שונים. למשל די אם נניח קיומן של שלוש דרגות לכל אחד מחמשת התנאים הללו כדי לאפשר לכל צד בכל חלק לקבל אחד מ-243 (3 בחזקת 5) צבעים.

תוספת כחול-שמיים מופיעה גם אצל מספר תוכים כמו המקאו (Macaw), ואחרים. כדי למצוא הסבר מתאים לכל תוכי יש לדעת מהו תפריטו ומהם דרכי השגת התפריט. הרבגוניות בצבעי התוכים מרמזת על רבגוניות בתפריטים ובדרכי ההשגה. גם אצל דגים לא מעטים יש תוספת צבע כחול-שמיים. אקווה לטפל בהסברים לכל אלה בהקדם.

### ו) סיכום לפרק זה

לאור כל מה שראינו עד עתה ניתן לאמור שהתכונות הפיסיקליות המותאמות אצלי לצבע כחול-שמיים, "אלסטיות לתוספת פיתול" ו"התכווצות בעודף קור", ניתנות כנראה להוכחה סטטיסטית. מובן שכדי להשלים את המחקר יש לבחון עוד סוגים של בעלי חיים ולוודא שאכן ההשערות שלי לגבי אלה שלעיל מוצדקות. אולם כבר עתה יש לדעתי ביסוס ראשוני להתאמות אלה, לפחות ברמה לוגית גבוהה יותר מאשר ההנחות המקובלות כיום לפיהן צבע זה ואחרים נועדו לצרכים "תקשורתיים חברתיים" כגון הסוואה, אזהרה וכו'.

הצבע כחול-שמיים מופיע גם כחלק מצבעים משולבים כגון ירוק, ארגמן, סגול וכו'. טיפול מורחב בנושא כל הצבעים, כולל המשולבים, יצריך ספר שלם. אקווה שימצא התקציב והזמן לבצע זאת.

## פרק ה - דוגמאות מהחי לאדום

### אדום-שקיעה

דוגמאות בולטות מהחי לתכונות הפיסיקליות המותאמות לצבע אדום-שקיעה, "אלסטיות לתוספת כיפוף" ו"התפשטות בעודף חום".

#### א) כדוריות הדם האדומות

לכדוריות הדם האדומות יש מידה רבה של "אלסטיות לתוספת כיפוף". תכונה זאת דרושה כדי שאפילו בהסתעפויות של הנימים הדקיקים ביותר הכדורית תעבור. המחשה יפה לתכונה זאת ניתן לראות למשל בעמ' 118 של הספר "גוף האדם - המכונה שלא תאמן", תרגום מאנגלית ד"ר ע. כרמל, הוצאת מעריב 1989. רואים שם כיצד כדוריות הדם משנות צורה בהתאם למקומן בנימים. כידוע, כדוריות הדם גם מתפשטות בחום.

#### ב) הלשון

הלשון של בעלי חיים רבים היא בעלת תוספת של גוון "אדום-שקיעה". למשל הלשון של חתול בר, כפי שרואים בברור בעמ' 221 של הספר Natural History הנ"ל. גם הלשון של הפנדה נראית אדומה בעמ' 222. בתמונה של כריכת הספר רואים טיגריס עם לשון אדומה. תוספת הצבע אדום-שקיעה קיימת בלשון כאשר היא משמשת בעיקר להכנסת המזון פנימה או להעברת המזון ממקום למקום בתוך הפה. פעולות אלו נעשות בעיקר על ידי קיפול הלשון, כפי שכל אחד יכול לחוש בעצמו. לעומת זאת, אם הלשון משמשת לצרכים אחרים מתקבלים צבעים אחרים. למשל, לשונה של הגירפה משמשת קודם כל לקטיפת העלים מהעצים הגבוהים. ללשונה יש גוון של שחור התואם בטבלה הנ"ל את התכונה "קשיחות לתוספת מתיחה". גם לשונם של תוכים מסוימים הוא בעל גוון שחור משום שהלשון שלהם משמשת למעיכת הגרעין וריסוקו, דבר המצריך ממעטפת הלשון לעמוד במאמצי מתיחה בכיוונים שונים. אצלנו הלשון בעלת גוון קל של אדום-שקיעה עם תוספת של לבן. הלבן מותאם לתכונה המכנית "אלסטיות לתוספת מעיכה". ואכן, במהלך האכילה מצויה הלשון שלנו במאמצי מעיכה, בנוסף לצורך בקיפולה כמוסבר לעיל.

#### ג) קופים

באחוריים של סוגי קופים רבים יש בליטה אדמונית נפוחה בעלת תוספת של אדום-שקיעה. התפיחה מהווה לקוף מעין כרית ישיבה. במיוחד נכון הדבר לגבי קופים המרבים לשבת. אצל משפחת הבבוניס (Baboon) למשל התופעה בולטת במיוחד. כל הצורה המנופחת הזאת דורשת תכונת "אלסטיות לתוספת כיפוף". אם לא תהיה אלסטיות לא תחזור הבליטה לקדמותה לאחר הישיבה. אם התפיחה תשאר פחוטה היא לא תשמש ככרית ישיבה נוחה. התכונה החומנית "התפשטות בעודף חום" של אדום-שקיעה מרמזת לי שגם הבליטות האדמוניות הללו אצל הקופים מתנפחות בחום. אין לי נתונים לגבי תופעה זאת אך אם למישהו יש במקרה צילומים של האחוריים של בבונים מסוימים בוגרים בחורף ובקיץ ניתן לבצע את ההשוואה.

#### ד) חרקים

הדוגמה הבולטת ביותר הם כנפי החפייה האדומות של חיפושיות ממשפחת פרות משה, למשל "פרת שבע הנקודות" (*Coccinella septempunctata*) בעמ' 166 בספר החרקים הנ"ל. לכנפי החפייה יש תוספת של אדום-שקיעה בנוסף לשבע נקודות שחורות (למעשה שמונה - ארבע על כל כנף, אך המרכזיות נראות מלוכדות כאשר כנפי החפייה סמוכות). תכונת "האלסטיות לתוספת כיפוף" ברורה כאן מעצם היות הכנפיים כה מכופפות בשעת מנוחה ובשעת תעופה. בעמ' 82-83 של הספר "Microcosmos-The invisible World of Insects, C. Nuridsany and M. Perennou, Stewart Tabony & Change New Yourk probably from 2000, רואים תמונות נהדרות ובהן ארבעה שלבים בתעופתה של חיפושית דומה אך כתומה. נוכחים שהצורה של כנפי החפייה נשארת קמורה למרות התנועה באמצעות כנפי התעופה שמתחת לכנפי החפייה. זמן רב לא היה לי ברור כיצד עוזרות כנפי החפייה הללו ליעילות התעופה של החיפושית הזאת. שהרי ברור לי, על פי הגישה החדשה שלי, שצריכות להיות לכנפי החפייה מטרה ראשונית התורמת ליעילות התעופה עצמה. התעלומה נפתרה כאשר התבוננתי היטב בארבעת התמונות הללו. בתמונה הראשונה אוזחת החיפושית את קצה הגבעול כאשר כנפי התעופה מקופלות מתחת לכנפי

החפייה. בתמונה השניה החיפושית מרימה את כנפי החפיה ופורשת את כנפי התעופה. נוכחים שכנפי התעופה כמעט שקופות בחצי הקרוב לחיבור עם הגוף. חלק זה מצוי ממש מתחת לכנפי החפייה. בחצי המרוחק יותר של כנף התעופה הצבע שחור נוצף. בתמונה השלישית החיפושית עדיין אוחזת בגבעול אך כנפי התעופה שלה מתנופפים. בתמונה הרביעית החיפושית עזבה את קצה הגבעול והיא מעט מעליו כאשר קצב הנפנוף של כנפי התעופה נראה כמהיר יותר. נשאלת השאלה לשם מה מטפסת חיפושית אל ראש הגבעול ורק משם היא מתחילה בתעופה. תופעה כזאת של טיפוס לראש הגבעול לצורך תעופה מוכרת לי מהתנהגותן של מלכות הנמלים בשעות השמש הראשונות שלאחר הגשם. הן מחפשות מקום גבוה ומשם נוסקות. בספרות מתוארת התופעה ככזאת שנועדה לעזור לנמלה המלכה לייבש את כנפיה בשמש ומיד עם התייבשותן לעופף. אני משתדל לצפות בכל שנה בתהליך הזה מייד עם צאת השמש לראשונה לאחר גשם ראשון. מלכות נמלים רבות מתרוממות ישר מהקרקע כאשר כנפיהן מתייבשות. אך במקרה של החיפושית הבוגרת שלנו הכנפיים יבשות. אין צורך לטפס למקום גבוה וגלוי לשמש כדי לייבשן. אם כך מדוע החיפושית שלנו מטפסת לקצה הגבעול לצורך תעופה. תוך כדי התבוננות מעמיקה בארבעת התמונות הללו הבזיקה אצלי התשובה. כאמור, בתמונה השלישית החיפושית עדיין אוחזת בגבעול ותדירות כנפיה אינה גבוהה, ובתמונה הרביעית היא כבר לאחר עזיבת קצה הגבעול ותדירות כנפיה נראית גבוהה. כלומר, מתקבל אצלי הרושם הרושם שכנפי החפייה הפתוחות איפשרו לחיפושית להחזיק עצמה באויר, עם אחיזה קלה בגבעול, עד אשר הנפנוף בכנפי התעופה יגיע לקצב כזה המאפשר טיסה בטוחה ללא נפילה לקרקע. הדבר מזכיר במידת מה את הגברת קצב הסיבוב של פרופלור ההליקופטר עד שהקצב מספיק מהיר להרמת ההליקופטר הכבד. אך את זאת יכולה החיפושית לעשות גם מהקרקע כדוגמת חרקים אחרים (דבורים, זבובים ועוד). אם כן, במה מועילות כנפי החפייה. כדי להבין זאת נניח לרגע שלא היו כנפי חפייה והחיפושית מנסה להתרומם. החיפושית עצמה כבדה יחסית. כדי להתרומם עליה להפעיל קצב נפנוף גדול. זה דורש שרירים חזקים יותר ובזבז אנרגיה. אם ניתן להקטין את הצפיפות הסגולית של החיפושית ביחס לאויר יהיה לחיפושית קל יותר להתרומם ולעוף. דומני שתפקיד כנפי החפייה הוא להקטין את הצפיפות הסגולית של החיפושית. הדבר דומה לתפקידו של מצנח הנפרש מעל צנחן. האויר המצטבר בדחיסות מתחת למצנח, תוך כדי הנפילה מטה גורם לכך שכמות האויר הדחוס שאינו בורח מהשוליים של המצנח, הופך בעצם לחלק מהמצנח עצמו המחובר לצנחן. לכן הצפיפות הסגולית של המצנח פלוס הצנחן יורדת והדבר מאפשר לשניהם יחד להאט את הצניחה מטה. לכן אני סבור שכנפי החפייה לא נועדו לחפייה. הן משמשות כמצנח הבולם את נפילתה של החיפושית מטה ומאפשר לכנפי התעופה לצבור מהירות נפנוף עד שהקצב מספיק כדי להרים את החיפושית הכבדה. לערכתי **אלו לא סתם כנפי חפייה - אלא כנפי צניחה**. כדרכם של מצנחים - חשוב שהם יהיו קמורים במידה רבה כדי שאויר רב ככל האפשר ילכד מתחת למצנח ולא יזרום החוצה. כך הופך האויר הלכוד לחלק מהמצנח ומקטין את משקלו הסגולי. לכן יכולה החיפושית להסתפק לצורך התעופה בכנפיים עדינות כמעט שקופות לצורך השגת דחף. הדבר עשוי להזכיר את מטוסי האולטרא-לייט. יש להם מצנח מקומר ומנוע דחף. שוב מוכח שהטבע מצא את הפתרון האופטימלי הרבה לפני האנושות. ככל שיש יותר אויר לכוד כך המשקל הסגולי יורד. מאמירה זאת ניתן להסיק כי רצוי שכנף הצניחה תהיה גדולה פי כמה. אך במקרה כזה יגדל מאד משקלה הפיסי של אותה כנף ויהווה מעמסה גדולה בפני עצמה. היחס הטוב ביותר בין כמות האויר הכלוא מתחת לכנף הצניחה לבין משקל כנף הצניחה עצמה יתקבל כאשר כנף הצניחה חצי כדורית. (יחס שטח המעטפת לנפח הגוף הוא קטן ביותר בגוף כדורי). עתה כאשר אנו מבינים את תפקידן של כנפי החפייה של החיפושית הזאת, או כפי שאני מעדיף לכנות אותם **כנפי הצניחה**, יש בידינו לענות על השאלות בדבר הצבעים המיוחדים שלהן. אך לפני כן אעיר שבאופן כללי אני מצפה שגם סוגים אחרים של חיפושיות ישתמשו בכנפי החפייה שלהם כבמצנחים. לכל חיפושית יש בוודאי את שיטות הצניחה שלה. הנושא רחב ודורש מחקר מעמיק.

כאשר כנפי הצניחה דקות יחסית וקמורות, כמו אצל החיפושית **פרת שבע הנקודות** סביר לצפות שבמהלך התעופה יופעל לחץ אויר מבפנים על כנפי הצניחה הללו והם תתנפחנה במקצת. כדי שהן לא תקרענה יש על כל כנף ארבע נקודות שחורות. לשחור מותאמת בטבלה התכונה המכנית "קשיחות לתוספת מתיחה". ארבעת הנקודות השחורות הללו משמשות לכן למניעת הקריעה של הכנף. ההתמתחות המתונה של כנף הצניחה מצריכה אלסטיות לכיפוף כדי שעם הסרת הלחץ הפנימי תשוב הכנף לצורתה המקורית כדי למלא את תפקידה העיקרי כמצנח בעת הנסיקה מעלה. כלומר נדרשת מהכנף התכונה המכנית "אלסטיות לתוספת כיפוף". בימים חמים או בהרים גבוהים בקיץ, צפיפות

האוויר יורדת. עקב כך חייבת כנף הצניחה להתפשט. אחרת משקל האוויר שילכד מתחת לכנף הצניחה יהיה נמוך מדי ומשקל הסגולי של החיפושית, כולל האוויר הלכוד, יהיה גדול מדי והחיפושית תתקשה לעוף. כלומר, יש הגיון בציפיה לכך שכנף הצניחה תהיה בעלת התכונה "התפשטות בעודף חום". כלומר יש בידינו הסבר פיסיקלי לצורתה וצבעיה של פרת שבע הנקודות.

**פרפרים:** נדהמתי להיווכח שדווקא בין הפרפרים של ארץ ישראל, יש מעט מאד תוספת של צבע אדום-שקיעה, שלא לדבר על פרפר שכל כנפיו אדומים. להערכתי הסיבה לכך נעוצה בעובדה שרצוי מאד שכנף הפרפר תהיה בעיקרה שטוחה ולא קמורה. כנף קמורה לוכדת את האוויר בתוכה ואינה מגדילה את שטח האוויר הנדחף כלפי מטה, אך היא מעלה את משקל הכנף. דבר זה אינו רצוי בעיקר אצל הפרפרים. זאת משום שהכנף שלהם גדולה מאד, יחסית לגוף הרך, ומחוברת לגוף בנקודת אחיזה אחת. לכן המומנט (כוח כפול מרחק) הכולל על אותה נקודה גדול מאד, בעיקר כאשר הכנף מתנופפת. תוספת משקל על ידי קימור הכנף עשויה להגדיל את המומנט בהרבה, דבר הדורש חיזוקים מיוחדים בגוף. ואכן בספר "פרפרי ארץ ישראל", יצחק איזנשטיין, הוצאת עם עובד משנת 1983, מבין עשרות סוגי הפרפרים שם מצאתי רק פרפר אחד שהצבע העיקרי של כנפיו אדום. מדובר בפרפר קטן **סו אדום מבריק** (*Zygena graslini* Led). עמ' 119 ותמונה 253. מחבר הספר מציין שהסו הזה הוא פרפר אך נראה כמו חיפושית. (כנראה משום שכנפיו נראות קמורות במידה מסוימת ויש כתמים שחורים על הכנף האדומה). הקימור של כנפיו עשוי להיות קשור אם התכונה המכנית המותאמת בטבלה שלי לאדום-שקיעה "אלסטיות לתוספת כיפוף". תוספת הכתמים השחורים, אצל הסו אדום מבריק, באים כנראה למנוע מתיחת הכנף למרות קמירותה. נזכור ששחור מותאם לתכונה "קשיחות לתוספת מתיחה". בפרק על הצבע השחור אדון בכך. מהבחינה החומנית מותאם הצבע "אדום-שקיעה" ל"התפשטות בעודף חום". זאת עשויה להיות סיבה טובה נוספת מדוע כה נדיר הצבע האדום כצבע עיקרי בכנפי הפרפרים בישראל. פרפרים רבים מתעופפים כל העת בין צל העלים לחום קרני השמש. אם כנפיהם יתפשטו בחום עקב כל חשיפה לשמש ישתנה השטח שמתחת לכנף בתדירות גבוהה והתעופה לא תהיה יציבה. על פי ספר זה של איזנשטיין מ-1983 פרפרי הסו האדום המבריק מתעופפים בשדות שבהם גדלה חרחבינה מכחילה. בספרו המאוחר יותר "על פרפרים וצמחים בארץ ישראל" בהוצאת משרד הבטחון, (כנראה מסוף שנות ה'80) יש תמונה של נקבת הסו-אדום-מבריק בעת הטלת ביצים על הצד התחתון של עלה החרחבינה המכחילה. מוסבר שמוטת הכנפיים כ-2.8 ס"מ. כמו כן מובאות שם תמונות והסבר לגבי צמח זה. החרחבינה המכחילה (*certicum Eryngium*) ממשפחת הסוככיים הוא צמח רב שנתי. מפתחת בחורף ובאביב שושנת עלים מבריקים חלקים ולא משוונים בבסיסה. עם תום עונת הגשמים עולה גבעול מסועף עם עלים קוצניים וצבעו הופך לכחול. בדומה לצמחים ממשפחת הסוככיים, התפרחת נראית כקרקפת. היא בעלת פרחים לבנים קטנים המרוכזים במרכז של חמישה עלים קוצניים ארוכים בעלי צבע כחול-שמיים. גם על פי הספר "צמחי ישראל בתמונות", ע. פליטמן, ק. חן, א. דנין וא. שמידע, הוצאת מסדה, 1983, זהו צמח נפוץ מאד בארץ ממשפחת הסוככיים הפורח בחודשים מאי-אוגוסט ואז כולו מכחיל. בעמ' 120 של "מדריך החרקים בישראל" הנ"ל מתואר הסו אדום מבריק (או סו מבריק אדום - במדריך זה) כפרפר מיוחד במינו בישראל. נתקלים בו באביב עד סוף חודש אפריל והוא מעופף בכבדות או עומד על הצמחים הנמוכים. כאשר הוא נח מונחות הכנפיים משני עברי הגוף ולא כמנהגם של הפרפרים הרגילים המרימים אנכית את כנפיהם בשעת המנוחה. מתאור זה אני מסיק שאכן כנפיו קמורות במידה כזאת המונעת ממנו להצמיד את הכנפיים אנכית בעת המנוחה. אין לי עתה הסבר לצורתו המיוחדת. אך אם הוא מבלה את כל חייו באזור קטן יחסית בין צמחי החרחבינה המכחילה - יתכן שהוא נדרש לפחות כושר תעופה למרחקים גדולים לשם מציאת צוף. במקרה כזה הוא עשוי להתנהג חלקית כמנהג החיפושיות ומכאן גם הדמיון שראה איזנשטיין בין הסו-אדום-מבריק לבין חיפושית. כאמור, אצלי מותאם הצבע אדום-שקיעה לתכונה החומנית "התפשטות בעודף חום". על פי התאורים הנ"ל של סביבת מחייתו של הסו-אדום-מבריק לא מן הנמנע שמקום חיותו העיקרי הוא מתחת לעלים של החרחבינה המכחילה והוא עף מדי פעם אל הפרחים בתפרחת שעל הגבעולים הארוכים החשופים לשמש היוקדת. לא מן הנמנע שהצבע האדום על כנפיו של פרפר זה נותן מענה לצרכים הפיסיקליים הקשורים במעברים כאלה ממקום נוח יחסית למקום חם וחשוף לשמש היוקדת.

חיפשתי באינטרנט ומצאתי שבאפריקה יש פרפר גדול שצבעו אדום כולו. מדובר בפרפר **Cymothoe sangaris** ממשפחת הנמפתיים (Nymphalidae) בעל מוטת כנפיים שמעל 5 ס"מ. על פי האתר של

המוזיאון האפריקאי המלכותי (Royal Africa Museum) לפרפר ממין זה יש צבע ייחודי בעולם הפרפרים. ידועים רק כ-12 מינים בעולם, הקרובים למין זה, בעלי כנפיים אדומות בעיקרן. תפוצתו במרכז-מערב אפריקה: מרכז זאיר, סירה-לאונה, הרפובליקה המרכז אפריקאית, ניגריה, אנגולה וקמרון. כנפיו נראות בתמונה באינטרנט כשטוחות אם כי דומני שניתן להבחין בקיפולים נקודתיים זעירים הפרושים על פני כל הכנף. עורקי הכנפיים אינם בולטים במיוחד. זאת בניגוד לרוב הפרפרים. לא מצאתי עדיין די מידע לגבי מקום חיותו המדויק והתנהגותו של פרפר יפה זה. אך על פי מה שתארתי עתה מתקבל אצלי הרושם ששיטת החיזוק של הכנפיים אצל פרפר זה היא על ידי תוספת קיפולים זעירים במשטח הכנף כולו ולא על ידי קימומים בין העורקים. אם אכן יש קיפולים זעירים כאלה אצל הפרפר האדום האפריקאי הם עשויים להסביר את הצורך בתכונה המכנית "אלסטיות לתוספת כיפוף" המותאם בטבלה לצבע אדום-שקיעה. נעבור לתכונה החומנית. מוטת הכנפיים הגדולה של הפרפר האדום הזה מרמזת שהוא נוהג לעוף למרחקים גדולים. סביר שזאת במטרה להגיע לאזורי הפרחים המיוחדים לו. (כזכור לכל פרפר יש תפריט מסוים). מאחר ומדובר באפריקה החמה יהיה סביר להניח שהפרפר עף מסביבה לחה אחת, למשל בקרבת נחלים או מקורות מים ולחות אחרים (למשל צמחיה צפופה הסופגת את טל הבוקר), אל סביבה לחה אחרת. בדרך שבין שתי סביבות לחות הוא עובר כנראה במקומות פתוחים הגלויים יותר לשמש ולכן גם חמים יותר. במקומות כאלו גם צפיפות האויר יורדת ביחס לצפיפות במקומות הלחים. עקב מעברים כאלה על הכנף להתפשט במקצת באופן שווה בכל שטח הכנף כדי להדוף את אותה כמות של אויר. התכונה החומנית "התפשטות בעודף חום" של הצבע אדום-שקיעה מוסברת לכן ככזאת הנדרשת בגין המעברים התכופים אל מקומות חמים, וההתפשטות חיונית לצורך תעופתו היציבה של הפרפר האדום הזה.

לאחר שכתבתי את כל זאת הלכתי לחפש בספריות חומר נוסף על הפרפר האפריקאי האדום הזה ועל קרובי משפחתו. באחת הספריות מצאתי ספר שלם באנגלית שהוא מילון צבעוני של פרפרים ועשים כלל עולמי:

The Dictionary of Butterflies and Moths in Colour, E. Laithwaite, A. Watson and P.E.S. Whalley. Publisher Michael Joseph, London 1975.

בטבלה 216 הצבעונית של ספר זה מצאתי את תמונתו הצבעונית של הפרפר האדום שלנו, **Cymothoe sangaris**. באותה טבלה מצוי גם פרפר דומה מאותה משפחה אך כולו כתום: **Cymothoe coccinata**. במילון עצמו מוסבר על הפרפר האדום **Cymothoe sangaris** כדלהלן בתרגום חופשי שלי:

**Cymothoe sangaris** " (Godart blood red cymothoe) מוטת כנפיים 60-70 מ"מ, תפוצה: מערב אפריקה עד מערב אוגנדה, מערב קניה ומערב טנזניה. זה סוג החי ביער שם נתן למצוא אותו ברוב חודשי השנה. הוא דומה ל **Cymothoe coccinata** אך כנראה יותר אדום מבריק מסוג זה. לנקבה צבע שונה, בדרך כלל אפור-חום עם כתום-חום בבסיס הכנפיים. הצד התחתני של הכנפיים הוא חום-כהה עם קו אמצעי אדום. כמות השחור על הכנפיים האחוריות משתנה, בכמה פרטים הם מודגשים במיוחד. תולדות מחזור החיים (life history) של סוג זה אינם ידועים".

מציטטה מתורגמת זאת אנו נוכחים בין היתר שסוג זה חי ביערות הטרופיים הלחים במרכז מערב אפריקה. שמו באנגלית מעיד גם על צבעו: אדום-דם. לפחות עד 1975, כאשר הוכן ספר זה, לא היו ידועים פרטים על חייו. אני לא הצלחתי למצוא לגביו פרטים באינטרנט, אפילו לא באתרים המתמחים בנתוני מיון (Taxonomy). לגבי הסוג הדומה לו **Cymothoe coccinata** יש במילון פרטים לגבי צבעי הנקבה. מודגש גם שהשרטוט הצבעוני (הכתום) הוא של הזכר ושהנקבה חומה בעיקרה. גם לגבי סוג זה לא ניתנים פרטים אודות חייו. אם כי לא נאמר במפורש שהפרטים אינם ידועים. חיפשתי בספר זה פרפרים נוספים עם צבע עיקרי אדום בכנפיהם. מבין אלפי הסוגים המופיעים בספר, המייצגים - על פי המחברים - את מרבית הסוגים הידועים בעולם, מצאתי רק עוד שני פרפרים עם כנפיים אדומות בעיקרן. אם כי לאף אחד מהם אין צבע כה אדום כמו לפרפר **Cymothoe sangaris**. בטבלה מס' 119 בספר מצאתי את השרטוט הצבעוני של הפרפר **Appias nero** (Fabricius orange albatros) צבעו כתום-אדום כולו, דהינו פחות אדום מאשר אצל **Cymothoe sangaris**. שמו באנגלית מרמז על צבעו הכתום אך מצאתי גם באינטרנט שני זנים אחד כתום ואחד כתום-אדום. על פי המילון הזה: גודלו של

פרפר זה הוא 70-75 מ"מ, כלומר ממש פרפר ענק. תפוצתו מצפון הודו, פקיסטן, דרום-מזרח אסיה, ועד הפיליפינים. פרפר נפוץ ממדינת סיקים לג'ווה וסולהוויסי (Sulawesi) (??). בזכרים נתקלים הרבה במים בקרחות יער, לעיתים קרובות במספרים גדולים, אך הנקבות מתגלות בדרך כלל בחופה העליונה של היער. הזכר כתום עם עורקים שחורים בכנפיים הקדמיות וצהבהב בכנפיים האחוריות. הנקבה דומה אך יש לה גבולות שחורים סביב הכנפיים ורצועה שחורה על הכנפיים האחוריות. הזחל ניזון מסוגי Capparidaceae (בעברית ??). להרבה תת-סוגים שלו יש שמות שונים באזורים שונים בתחום של הסוג הזה. כנראה שסוג זה ייחודי בהיותו הפרפר היחידי שכולו בצבע כתום. כאמור, בתמונה בספר וגם באינטרנט קיים זן שכולו בצבע כתום-אדום. כאמור, הנקבה מצויה למעלה בחופת היער, וכנראה שם מטילה את ביציה ושם גדלים הזחלים. הזכר נראה מעופף מעל מים בקרחת היער. יש להניח שהטמפרטורה שם נמוכה יותר מאשר במרומי היער. אמנם הדבר לא נאמר במילון זה, אך סביר שהזכרים עולים אל חופת היער כדי להפגש עם הנקבות. יש להניח שהזכרים עפים הלך וחזור בין האזור הקרקעי מימי בקרחת היער ובין האזור החמים והחשוף יותר לשמש בחופת היער. כלומר הזכר עובר תכופות לאזורים חמים. שם צפיפות האויר קטנה יותר ושה מחייב כנראה התפשטות הכנף. כלומר אנו נוכחים שוב בקשר שבין התכונה החומנית "התפשטות בעודף חום" לבין הצבע אדום-שקיעה. אעיר עוד שהצבע כתום הוא שילוב של אדום-שקיעה וצהוב-שמש. לצהוב שמש יש תכונה חומנית "שימור עודף חום". יתכן שהזן הכתום שומר בכנפיו את החום הנספג באזורים החמים והפתוחים לשמש, לעת שבה הוא ימצא באזור קריר יותר.

לאור זאת אני מניח שגם הזכר של הפרפר האדום הנ"ל *Cymothoe sangaris* עובר תכופות ממקומות קרירים, אולי אפילו בקרבת מים, אל מקומות הגלויים לשמש ולחום. לכן התכונה "התפשטות בעודף חום" המותאמת אצלי לצבע אדום-שקיעה תופסת גם לגבי פרפרים נדירים אלו.

תופעה מעניינת נוספת אשר אני שם לב אליה עתה היא העובדה שהן אצל סוגים אלה והן אצל סוגים אחרים של פרפרים יש הבדלים ניכרים בין הצבעים בחלק העליון של הכנפיים לבין אלה שבחלק התחתון שלהן. אצל הפרפר *Cymothoe sangaris* הצד העליון אדום והצד התחתון חום-כהה. לי אין ספק ששני הצבעים הללו מצביעים על מקדמי התפשטות שונים בחום. הצבע האדום צפוי להיות בעל מקדם התפשטות גדול יותר. כלומר כאשר חם החלק העליון מתפשט יותר מהחלק התחתון. מה שצפוי במצב כזה היא **התקמרות** של הכנף. הדבר דומה לתופעה במד-חם הישן הדו-מתכתי, כאשר לכל מתכת מקדם התפשטות שונה. מידת הכיפוף של מד החום הצביעה על הטמפרטורה. יש להניח שאותה תופעה תקרה גם בכנפי פרפרים אחרים ובכנפיים ובמעטפות של בעלי חיים אחרים כאשר יש הבדלים ניכרים בצבעים בין החלק העליון והחלק התחתון. האפשרות להתקמרות הכנף האדומה בחלקה העליון אצל שני סוגי הפרפרים הנידונים מצביעה גם על התכונה המכנית הקשורה לאדום-שקיעה "אלסטיות לתוספת כיפוף". כאן אנו נוכחים היטב כיצד קשורות זו בזו שתי התכונות המכנית "אלסטיות לתוספת כיפוף" ו"התפשטות בעודף חום" המותאמים בטבלה שלי לצבע אדום-שקיעה. ולשם מה נחוצה התקמרות הכנף. לא מן הנמנע כי התקמרות זאת מפצה על ירידת הצפיפות של האויר שמתחת לכנף בשעות החום. קימור הכנף מאפשר לפחות אויר לחמוק מתחתית הכנף בעת הנפנוף. כך נוצרת שכבת אויר קטנה הנשארת כחלק מהכנף ובכך קטן המשקל הסגולי הכולל של הכנף (עם תכולת האויר הנחה בתוכו). ראה הדיון לעיל בנוגע לכנפי החפיה של החיפושית וכיצד הקימור עוזר לתעופה.

הפרפר השלישי האדום בספר המילוני הזה הוא *Rapala jerbis* (Fabricius common red flash) הכנפיים הקדמיות שלו אדומות כאשר בכל כנף השפה הקדמית בעלת פס רחב שחור. הכנפיים האחוריות אדומות. בגודל 35-41 מ"מ. תפוצה: סרי-לנקה, הודו, סיקים, בורמה ועד איי ליזר-סונדה (Lesser Sunda Islands) בדרום מזרח. זהו סוג די נפוץ בשטחים מיוערים עד לגבהים של 2440 מ'. כמו אצל אחרים בני מינו, הזכר הרבה יותר צבעוני מהנקבה, אשר צבעה בסוג זה חום בהיר. לא נתונים כאן עוד פרטים לגבי התנהגותו באזורים חמים, אך אני מניח שגם בפרפר אדום חלקי זה קיימות התכונות הפיסיקליות הנ"ל שראינו בשני הפרפרים האדומים הנ"ל.

חיפשתי בעוד ספרי פרפרים שנזדמנו לידי אם קיים בהם פרפר אדום. עברתי בעיון על מאות התמונות של פרפרים בספרים:

Butterflies of Saudi Arabia and its Neighbours, T.B. Larsen, Transworld arabian library Riyadh, 1984.

A Field Guide to the Butterflies and Burnets of Spain, W.B.L. Manaley, and H.G. Allcard, 1970.

לא מצאתי בשני ספרים אלה אף לא פרפר אדום אחד. מיעוט הפרפרים בטבע בעלי כנפיים שצבען כולו אדום מדגיש את החשיבות של התכונות "אלסטיות לתוספת כיפוף" ו"התפשטות בעודף חום" של הצבע אדום-שקיעה, אשר אינו רצוי לכנף השטוחה המתנופפת, ואם הוא מצוי במספר מצומצם מאד של פרפרים, יש לכך סיבות מיוחדות, כפי שראינו לעיל.

### (ה) עופות

אצל עופות מסוימים יש תפיחות באזור הצוואר, בסיס המקור, הלחיים וכו'. בהרבה מקרים תפיחות אלו הן אדומות. למשל הזכר של הברווז **אדרית מלכותית** (*Somateria spectabilis*) (עמ' 61 בספר הציפורים הנ"ל). יש לו **מקור** ותפיחה במצח בעלי תוספת של צבע אדום-שקיעה. כאמור, האדרית המלכותית חיה בחופי-ים ארקטיים ובמקווי מים מתוקים בטונדרה. את התכונה המכנית התואמת לאדום-שקיעה: "אלסטיות לתוספת כיפוף" של התפיחה האדומה ניתן להסיק מעצם קיומה של התפיחה הבולטת מאד לעומת סביבתה. בכלל, כל המצח שלו נראה רחב יותר ממצחה של בת זוגתו. גם המקור בצבע אדום-שקיעה של הזכר הנראה כנפוח במקצת ביחס למקור האפור של הנקבה. לאור כל זאת לא הייתי מוציא מכלל אפשרות שברווז זה נוהג לאכול דברים גדולים במיוחד המחייבים את פעירת המקור במידה כזאת הגורמת גם לכיפוף הנוצות באזור המצח. לאור השערתי זאת חיפשתי באינטרנט פרטים אודות מזונו והתנהגותו. להלן העתק מתוך אתר מהימן בשם *Toxomany* בכתובת <http://fwie.fw.vt.edu/WWW/macsis> בקשר לאדרית המלכותית (King Eider):

"forage in open sea or coastlines with sources of food at depths shallow enough to permit easy diving; forage in deeper waters than the common eider \*538\*; dive to 150-180 feet; partially opens wings when diving; probably uses wings and feet to swim \*554\*; food includes 95% animal matter and 5% plant matter; molluscs make up 46%, 20% is blue mussels; crustaceans make up 19%, 50% is king crab; echinoderms make up 17%, 8% is sand dollars and 6% is sea urchin \*2825,424\*; 24% of total stomach volume is gravel \*554\*; also eats caddisfly larvae, sea anemones, eelgrass, wigeon grass, algae, larvae of aquatic insects and beetles, bivalves, crabs, brittle stars, sea cucumbers, midges".

ובתרגום חופשי שלי: הוא ניזון בים הפתוח או לאורך החופים בעלי מקורות מזון בעומק רדוד מספיק כדי שיוכל לצלול בקלות. ניזון במים עמוקים יותר מאשר אדרית שחורת-כפה (common eider) (*Somateria mollissima*). צולל לעומק 45-54 מ', כאשר הכנפיים פתוחות בחלקן, כנראה משתמש בכנפיים וברגליים לשחיה. מזונו כולל 95% בעלי חיים ו-5% צמחיים. רכיכות מהוות 46%, שבלולים כחולים 20%, סרטנים 19%, 50% הוא סרטן המלך (King crab) (??), מסמירי עור (בעלי עור קשה וקוצני) מהווים 17%, 8% קיפודי ים שטוחים (sand dollars) (??), ו-6% קיפודי ים. 24% מתכולת קיבתו זה חצץ. ניזון גם זחלי זבוב-פיתיון (caddisfly larvae). שושנות ים, עשב-צלופח (??) (eelgrass), עשבי ברווזים פאלוארקטיים (??) (wigeon grass), אצות, זחלים של חרקים ימיים וחיפושיות, צדפות, סרטנים, כוכבי-ים, מלפפוני-ים וזבובונים.

צלילתו לעומקים של עד 54 מ' מרמזת על בעלי חיים וצמחים גדולים ונוקשים יחסית היכולים לעמוד בלחצים הגדולים יחסית בעומק זה. זאת בהשוואה לאדרית-שחורת-כפה החיה באזורים סלעיים לאורך חופי ים וצוללת בדרך כלל לעומק 3 מ' ולעיתים נדירות מגיעה לעומק 16 מ'. ואכן מהרשימה נוכחים כי



בין דברי המזון של אדרית מלכותית יש גם מסמירי עור, קיפודי ים, סרטנים ואפילו חצץ. חלק מהם כלולים גם בין מזונה של אדרית-שחורת-כפה, אך סביר שהמאכלים שלה קטנים יותר מאלו המצויים בעומק 45-54 מ'. על פי עמ' 61 במדריך הציפורים הנ"ל רואים שהזכר של אדרית שחורת-כפה הוא בעל מקור בצבע ירוק-אפור ומצחו וקרקפתו שחורים. מכאן השם.

כל זאת מסביר אצל המקור והמצח האדומים של האדרית המלכותית את התכונה המכנית "אלסטיות לתוספת כיפוף" המותאמת אצלי לאדום-שקיעה. כיצד נסביר את התכונה החומנית: "התפשטות בעודף חום" של המקור והתפיחה הזאת. כאמור, מדובר בברווז החי בחופי-ים קרים מאד הקפואים בשכבתם העליונה באביב. כידוע, מתחת לשכבה הקפואה נשמרת טמפרטורה גבוהה יחסית המאפשרת לדגים ויצורי ים אחרים לשרוד. מזונו של הזכר של אדרית מלכותית הצולל לעומק שמעל 45 מ' במים כאלה עשוי בהחלט לכלול יצורים שונים בעלי טמפרטורה גבוהה מזאת של השכבה העליונה. התכונה "התפשטות בעודף חום" במקרה זה מוסברת בכך שכאשר הזכר של האדרית המלכותית מכניס את מקורו ומצחו לשכבה העליונה הקפואה ומשם צולל לעומקים בעלי טמפרטורה גבוהה יותר ותופס שם במקורו יצורים גדולים וחמים יחסית, יש כאן מעבר מטמפרטורה קרה לטמפרטורה חמה יחסית. כלומר יש תוספת חום משמעותית. המקור וכנראה גם המצח מתחמים עקב כך וסביר שהם גם מתפשטים בחום. אם לא תהיה לו התכונה "התפשטות בעודף חום" עלולים המקור והמצח להיזקק. נשים לב שהחזה של האדרית המלכותית הוא בצבע אדמדם, דהינו אדום-שקיעה פלוס לבן. האדום שקיעה נחוץ לצורך המעברים הללו מקור לחום וגם לצורך אלסטיות לכיפוף עקב המזון הנקלט. ללבן קיימות התכונות הפיסיקליות "אלסטיות לתוספת מעיכה" ו"בידוד קור". שתי תכונות אלו בהחלט נחוצות בעת צלילה לעומקים גדולים. כלומר יש בידינו הצעה סבירה לתכונות המותאמות לצבע אדום-שקיעה הקיים במידה מודגשת במקור ובמצח של האדרית המלכותית, וגם באדמומיות של החזה.

הסבר דומה עשוי להיות טוב גם עבור עופות אחרות בעלות **מקור** בצבע אדום-שקיעה. למשל, המקור המעונקל בצבע אדום-שקיעה של התוכי שכולו ירוק **דררה** (*Psittacula krameri*) (ראה עמ' 191 במדריך הציפורים הנ"ל). כידוע, המקור משמש אצל התוכים לא רק לפיצוח גלעינים קשים אלא גם כ"רגל שלישית" בעזרתו הם מטפסים על העצים בצורה האופיינית להם. התכונה "אלסטיות לתוספת כיפוף" ברורה כאן. התכונה החומנית "התפשטות בעודף חום" של אדום-שקיעה מרמזת שתפריטו של הדררה כולל גם גלעינים חמים. זהו סוג התוכי היחידי שהתאקלם בישראל. אני נתקל בעשרות זוגות שלהם המתלהקים בצווחותיהם באזור השפלה. מידות החום בשפלה עשויות בהחלט לגרום לכך שפירות העצים יהיו חמים יחסית לפירות באזורים קרים. לכן הדבר עשוי להסביר את אדום-שקיעה של המקור גם מהבחינה החומנית. גם אצל השחפיות (*Sterninae*) יש מקורות בעלי תוספת של אדום-שקיעה. בעיקר אצל **הכספית** (*Hydroprogne tschegrava*) שמקורה עבה מאד ואדום. מדווח במדריך הציפורים הנ"ל שמקורה מצהיב לעיתים בחורף. צבע צהוב-שמש מותאם אצלי לתכונה "קשיחות לתוספת גזירה". לדוגמא: לברווזים מסננים מסוימים יש מקור צהוב. שינוי הצבע של המקור של השחפית מסוג כספית, מתוספת של אדום-שקיעה בקיץ לתוספת של צהוב-שמש בחורף, עשויה לרמוז על כך שבחורף משנה הברווז את תפריטו ואת שיטת השגת המזון.

את הסיבה האפשרית לתוספת צבע אדום-שקיעה בקרקפתו של ה**נקר** (*Woodpecker*) הסברתי בהרחבה באתר באנגלית שלי בדפים הדנים על BioColorPhysics. בקצרה אציין כאן שהלשון המתארכת של הנקר עוברת בסמיכות לחלק העליון של הגולגולת. תכיפות שליפת הלשון הארוכה לצורך לכידת חרקים במעמקי הסדקים של העץ מחייבת אלסטיות לתוספת כיפוף באזור הקרקפת. שינויים תכופים אלה מוסיפים גם חום לאותו אזור של הקרקפת. לכן נחוצות באזור הקרקפת שתי התכונות "אלסטיות לתוספת כיפוף" ו"התפשטות בעודף חום". הצבע אדום-שקיעה עונה על שתי התכונות הללו.

#### (ו) פרוקי רגליים

יש **סרטנים** רבים בעלי אשר חלקים גדולים בגופם הם בצבע אדום-שקיעה. למשל **סרטן הנזיר** (*Pagurus* sp.) אשר יש בידי תמונה נפרדת שלו, או סרטנים אחרים כפי שניתן לראות למשל בעמ' 155 של הספר הנ"ל Natural History. הזרועות של הסרטנים וגופם נפוחים במידה ניכרת בהשוואה לפרוקי רגליים

רבים. צורות מנופחות אלו דורשות מידה רבה של כיפוף ואלסטיות כדי שאם יש שינוי יחזור המצב לקדמותו. הסרטנים עוברים תכופות אל מקומות חמים כאשר הם יוצאים מבין הסלעים שמתחת למים ונחשפים אל קרני השמש. תוספת החום הזאת מחייבת התפשטות בחום. מכאן ההסבר לקיומו של הצבע אדום-שקיעה על גופם הנותן הן "אלסטיות לתוספת כיפוף" והן "התפשטות בעודף חום".

## פרק ו - דוגמאות מהחי לצהוב

### צהוב-שמש

**דוגמאות בולטות מהחי לתכונות הפיסיקליות המותאמות לצבע צהוב-שמש: "קשיחות לתוספת גזירה" ו"שימור עודף חום":**

#### **ג) יונקים**

צבע פרוותם הבסיסי של טורפים גדולים רבים ממשפחת החתוליים הוא בעיקר צהוב-שמש. למשל: אריה (Lion), נמר (Leopard), ברדלס (Cheetah), טיגריס (Tiger), יגואר (Jaguar), ועוד. תמונת מרהיבות שלהם ניתן לראות למשל בספר A. Cleaver, "Big Cats", Todtry, 1995. כל הטורפים הללו מתבססים בשיטת היציד שלהם על ריצה מהירה מאד תוך כדי ביצוע תפניות חדות, דילוגים ותמרונים שונים. פעילות זאת גורמת כנראה לחיכוך רב של הפרווה עם האויר ולמאמצי גזירה גבוהים בהם על הפרווה לעמוד בעיקר בעת התפניות החדות. מכאן הצורך בתכונה המכנית "קשיחות לתוספת גזירה". כידוע, כל הטורפים האלה הם בעיקרם טורפי לילה למרות שמדי פעם הם צדים גם במהלך היום, כפי שרואים לא פעם בסרטי הטבע. יש חשיבות לכך שבמהלך היום תצבור פרוותם חום ותשמור אותו לפעילות הלילה. כמו כן גם בעת הריצה המהירה בלילה הפרווה מתחממת בשל חיכוך עם האויר. חשוב שחום זה ישמר כדי שהגוף ישאר חם לקראת הריצה הלילית הבאה העשויה לבוא תוך זמן קצר בהזדמן טרף נוסף. לכן, התכונה החומנית הנדרשת מהפרווה היא "שימור עודף חום". כלומר יש בצבע פרוותם של חתולים גדולים אלה כדי לחזק את ההתאמה שביצעתי בין צבע צהוב-שמש לבין התכונות הפיסיקליות "קשיחות לתוספת גזירה" ו"שימור עודף חום".

יושם לב שהצבע של הפרווה אצל חתולים גדולים אלה נשאר בעיקרו צהוב אפילו אצל הטיגריס הסיבירי (Siberian tiger) כפי שרואים בעמ' 77 בספר Big Cats הנ"ל, אם כי יש תוספת מוגברת יותר של פסים לבנים באזור העיניים וסביבות הפה, כנראה כדי לאפשר "בידוד מעודף קור" המותאם אצלי לצבע לבן. נשים לב גם שהטיגריס בנגלי (Bengal tiger) הרגיל הוא בעל פרווה בעלת גוון צהוב-כתום. אך לזן החי בהרים יש פרווה לבנה בעיקרה, למרות שאינו לבקן, כפי שרואים בתמונות וקוראים בהסברים בעמודים 28-29 של הספר הנ"ל. אין לי כרגע די אינפורמציה לגבי התפריט המיוחד של טיגריס בנגלי לבן זה בהרים. אך סביר שבהרים בעלי החיים המשמשים טרף לאותו טיגריס פחות מהירים מאשר האנטילופות באזורים המישוריים. אם נכון הדבר הרי שאותו טיגריס נמצא יותר בתנועת התגנבות איטית, בלילות הקרים בהרים, ומכאן כנראה הצורך בתכונה "בידוד מעודף קור" המותאם אצלי ללבן. בנוגע לתכונות המותאמות לצבע הלבן ולדוגמאות מהחי של לבן - ראה פרק ז'.

יוצא דופן נוסף הוא הנמר השחור (Black leopard) (ראה עמ' 34-35 בספר הנ"ל). הנמר השחור נפוץ במאליה החמה שבדרום מזרח אסיה. הוא חי בעיקר על עצים. שיטת היציד שלו כוללת בעיקרה המתנה ארוכה לטרף שיעבור מתחת לענפים והתנפלות עליו. הצבע השחור מותאם אצלי לתכונה החומנית "בידוד בפני חום", דבר שבהחלט יכול להסביר את צבע הפרווה של הנמר השחור. יוצאים מהכלל הללו רק מחזקים את הכלל של פרווה צהובה בעיקרה שראינו אצל החתולים הגדולים הנ"ל בעלי כושר הריצה המהיר וכושר התמרון הגבוה. בנוגע לתכונות המותאמות לצבע השחור ולדוגמאות מהחי של שחור - ראה פרק ח'. מההסברים שם תוכל ללמוד גם על סיבות אפשריות לפסים ולנקודות השחורות בפרוות הצהובות של נמרים, טיגריסים וחתולים גדולים אחרים.

#### **ב) דגים:**

בספר הנ"ל Natural History, עמ' 176 מופיעה שרטוט של הזכר של סוג הדג **סיון-ים** (Seahorse) בצבע צהוב בעיקרו. כל הצורה וההתנהגות של סוסון הים מצביעים על כך שהוא מצוי במאמצי גזירה מרובים. כידוע סוסון הים נאחז בזנבו הנלפף על ענף כדי שהזרמים החזקים לא יסחפו אותו מאזור מחייתו בו הוא ממתין לצוד בעלי חיים קטנים החולפים לידו על ידי שאיבה באמצעות פיו המוארך. גופו צריך להשאר יציב עד כמה שניתן אך יחד עם זאת בעל אפשרות לשינויים בהתאם למצב. לאור זאת התכונה "נוקשות לתוספת גזירה" נראית סבירה עבור אותו סוסון ים. כידוע, הזכר של סוסון הים הוא זה השומר בבטנו את הצאצאים עד שהם בוגרים ונפלטים החוצה בהמוניהם. אין ספק שטיפוח הצאצאים בבטן הזכר מצריכה מידה רבה של שמירת חום. הבטן הצהובה במיוחד אצל הזכר של סוסון הים מוסברת לכן כקשורה בתכונה החומנית "שמירת עודף חום"

דג נוסף הבולט בצבע הצהוב שלו הוא **נתחן סגול** (Yellowtail surgeonfish) בעל הזנב הצהוב, כאשר כל יתר הגוף סגול פרט לקצות סנפירי החזה הצהובים. לדג זה כידוע יש קוצים נשלפים בשני הצדדים של בסיס הזנב הצהוב. אני מתכנן לתת הסבר מפורט על הדג הזה כולל תמונה יפה באתר שלי באנגלית. כאן אציין רק שבמדריכי הדגים (כגון עמ' 96 בספר "מדריך הדגים של ישראל", ד. גולני וד. מרום בהוצאת כתר 1997) מוסבר שהקוצים הללו הם דמויי להב חד ונשלפים אופקית בשעת סכנה. אני אמנם סבור שהקוצים הללו נחוצים לאותו דג לשם השגת תפריטו: אצות שהוא מגרד בשיניו דמויות כף בקדמת שונית האלמוגים. אני מניח שאם יבדקו היטב יגלו שהוא נאחז בשונית באמצעות תקיעת אחד הקוצים בחלק קשה, זאת כדי שהזרמים החזקים והמערבולות לא יפריעו לו בעת שהוא מגרד את האצות. הנחה זאת מקורה בגישה הכללית שלי שלפיה הגוף של כל בעל חיים בנוי קודם כל כך שהוא ישיג את תפריטו. זאת היא המטרה הראשונית. בריחה מאויבים, השוואה וכו' הן מטרות משניות המושגות כדרך אגב לאחר שהושגה המטרה העיקרית. חיזוק להנחה זאת אני מוצא בכך שלדגים מסוג **נצונים** יש חודים בסנפירי גבם אותם הם אכן תוקעים בסדקי הסלעים כדי שלא יסחפו בזרמים החזקים שם. בכל מקרה, תקיעת החוד אופקית אצל הנתחן הסגול בשונית או באויב, ושליפתו, דורשים מהזנב יכולת לבצע תנועה חדה וקצרה לצד של החוד הנשלף. תנועה כזאת מלווה במאמצי גזירה גבוהים על הזנב. לכן חשובה התכונה המכנית של הזנב "נוקשות לתוספת גזירה". את התכונה החומנית של צהוב: "שימור עודף חום" קשה יותר להסביר. הכיוון שהייתי מציע כרגע הוא כדלקמן: לשלם ביצוע התנועה החדה הזאת של הזנב דרושה שמירת חום. זאת משום שהתנועה עצמה פירושה יצירת מערבולות חזקות יחסית באזור הזנב וקירור אותה סביבה. לכן הזנב עלול להתקרר מתחת לגבול הרצוי לתפקודו. "שימור עודף חום" של הזנב עשוי לעזור לו בשניות קריטיות אלו שבהם הזנב נתקל במערבולות קרות מידי. כלומר יש בידינו הסבר תחילתי למשמעות הצבע הצהוב בזנב הנתחן הסגול. הסבר דומה עשוי לתפוס גם לגבי קצה סנפיר החזה הצהוב שלו.

בשונית האלמוגים יש דגים לא מעטים בעלי גוף צהוב. לא מן הנמנע שההסבר שנתתי לזנב הצהוב של הנתחן הסגול יתפוס גם לגביהם. אשאיר את הדיון בהם לדפים מיוחדים באתר באנגלית שלי המוקדשים לדגי ים סוף.

#### ג) **ציפורים**

יש מספר סוגי ציפורים אשר להם מקור צהוב. למשל אצל הזכר של הברווז המסנן מסוג **ברכיה**. הסינון מחייב תנועות המקור לצדדים. תנועות כאלו גורמות למאמצי גזירה. כדי שהמקור לא יפגם דרושה תכונת "קשיחות לתוספת גזירה".

החלמון הצהוב של ביצה הוא דוגמא בולטת לתכונות "שימור עודף חום" ו"קשיחות לתוספת גזירה". בתכונה השניה קל להיווכח כאשר נוגעים באמצעות מזלג בחלמון, בהשוואה להתנהגות החלבון השקוף לפני בישול או הלבן אחרי בישול. לגבי התכונה הראשונה "שימור עודף חום" - דומני שמיותר להדגיש את חשיבותה עבור התפתחות העובר.

## פרק ז' - דוגמאות בחי ללבן

### לבן-ענני-קיץ

דוגמאות בולטות בחי לתכונות הפיסיקליות המותאמות לצבע לבן-ענני-קיץ: "אלסטיות למעיכה" ו"בידוד קור":

#### א) פרוות לבנות

פרווה לבנה היא בדרך כלל יותר רכה מאשר פרווה שחורה. כלומר גם הסיבים שלה פחות קשיחים וגם יש יותר אוויר בין סיביה. נניח שרוח רוח קרה, המתבטאת בהרבה מערבולות אוויר קטנות ומהירות, פוגעת בפרווה הלבנה. המערבולות ישברו והפרווה תשמור על צורתה. למערבולת יש אנרגיה האצורה בה. שבירת המערבולת בתוך הפרווה הלבנה גורמת לדעתי לכך שאנרגיית הקור הצבורה במערבולת תהפך לאנרגיית חום המתבטאת בפיזור. כלומר, לא רק שהפרווה הלבנה בולמת את חדירת הקור פנימה לגוף, ולכן היא מבודדת את הגוף מקור, אלא היא אפילו תורמת לתוספת חום כאשר רוחות קרות נשברות בה. דבר זה עשוי להשמע תחילה כחסר בסיס הגיוני בטבע. אולם, התבוננות ממושכת בבעלי חיים מראה שבעלי חיים עם פרוות לבנות או נוצות לבנות נהנים מהרוח ומהקור ואינם מחפשים מקום מסתור בפניהם. לדוגמה מחיי העיר: ניתן לראות לא פעם שדווקא כאשר יש רוחות חזקות עולות יונים רבות המצויות בעיר למקומות הפתוחים לרוח החזקה, כגון ראשי גגות, עמודי טלויזיה וכו'. גם בסרט הנהדר "ציפורים נודדות" ניתן לראות עופות לבנים, דומני שהיו אלה ברווזים לבנים, כאשר הן נהנות במהלכה של סופת שלגים העוברת עליה. סביר שגם דובים לבנים אוהבים סופות שלג ורוחות קרות, אחרת הם היו נכחדים באזורי הקוטב.

#### ב) חלבון לבן של ביצה קשה

כאשר משווים את תכונותיו המכניות של החלבון הלבן של ביצה הקשה לאלו של החלבון הצהוב ניתן להיווכח מייד, אפילו במגע יד, עד כמה החלבון הלבן אלסטי למעיכה.

#### ג) עצמות

צבע העצמות הוא לבן עכורי. כלומר שילוב של לבן ואינפרא אדום (עכור - מט) כפי שרואים בטבלת ההתאמות. העצמות מבודדות במידה מסוימת מעודף קור. אחרת הקור הנשמר בסחוס השקוף (ראה שקוף-אולטרה סגול) היה מתפזר לעצמות ולא היו לרבים מאתנו מחושי קור במפרקים. התלבטתי במשך שנים האם העצמות הן דוגמא לתכונה "אלסטיות לתוספת מעיכה" או לתכונה "קשיחות לתוספת מעיכה". לבסוף השתכנעתי שהצבע הלבן עצמו, של הסיידן, תורם לתכונת האלסטיות ואילו הצבע עכור-מט תורם ל"קשיחות לתוספת מעיכה". כאמור בפרק ב' - שתי התכונות, קשיחות ואלסטיות, אינן מנוגדות זו לזו. יכול גוף להיות קשיח למעיכה, כלומר שיהיה קשה למעוך אותו, אך אם כבר הצליחו למעוך אותו במידה מסוימת - יכול שתהיה בו תכונת אלסטיות למעיכה כדי שישבו למצבו המקורי לאחר הסרת הגורם המועך. לשם מה חשובה בעצמות התכונה "אלסטיות לתוספת מעיכה"? השרירים מצויים בלחצים מכיוונים שונים. כל לחץ על העור מעביר את הלחץ לשרירים ומשם לעצמות. השרירים עצמם מהווים בין היתר גם כבולמי זעזועים הסופגים חלק נכבד מהלחץ החיצוני. אך כדי שהם יבלמו את הזעזועים דרוש משטח מתחת לשריר שהוא עצמו יספוג זעזועים. אם לא כן השריר יפעל כקפיץ ויחזיר את הלחץ לגוף שלחץ עליו. זאת תוך יצירת לחץ פנימי יותר על העצם, על פי חוק הפעולה והתגובה של ניוטון, עם סכנה לשבירתה. כלומר, העצם עצמה צריכה לספוג זעזועים לא רק בכיוון ציר האורך שלה, בעצמות הגפיים למשל, אלא גם אנכית לציר האורך. כדי להבהיר נקודה זאת אביא כאן דוגמא מחיי היום יום של רבים מאתנו, לפחות אלה השומרים על בריאותם בחדרי הכושר. בחדרי כושר רבים קיים משטח מיוחד לאזור האימונים במשקולות. המשטח עשוי מגומי מוקשה. הוא אינו קשיח כמו הרצפה אך גם אינו גמיש כמו המזרון המשמש להתעמלות בשכיבה. כאשר משקולת כבדה נופלת בטעות על רצפה קשיחה היא עשויה לגרום לשקע ברצפה. ואם הרצפה קשיחה מאד, כברזל, תקפוץ המשקולת חזרה בערך לגובה ממנו היא נפלה ותסכן את המתעמלים. אם היו שמים באזור המשקולות את המזרונים הרכים המשמשים להתעמלות בשכיבה, הדבר כמעט ולא היה משפיע על תוצאות הנפילה. השקע ברצפה היה כמעט באותו עומק או שהמשקולת הנופלת היתה קופצת כמעט לאותו הגובה שללא המזרון. אך כאשר המשקולת נופלת על המשטח העשוי מגומי מוקשה היא מנתרת חזרה לגובה נמוך

בהרבה, אם בכלל, וגם לא גורמת נזק של ממש לרצפה שמתחת למשטח. כלומר המשטח ספג את המכה בעצמו, לא החזיר אותו ולא העביר אותו הלאה לרצפה. למזרון הרך יש אמנם דרגה גבוהה יותר של אלסטיות למעיכה אך אין בו די כדי לבלימת משקולות כבדות הנופלות מגובה של מטר. עבורם דרוש משטח שיש בו גם אלסטיות למעיכה וגם קשיחות למעיכה. עתה כאשר נופלת על המשטח משקולת כבדה מגובה מטר או יותר היא נתקלת במשטח אשר מידת הקשיחות שלו למעיכה מונעת את מחיצת המשטח באופן מלא לעובי דק מאד, עד כדי כך שלמעשה המשקולת מצויה במגע ישיר עם הרצפה, ומצד שני יש בה מידה מסוימת של אלסטיות למעיכה כך שלאחר שהמשקולת הוסרה מהמשטח חזר המשטח למצבו המקורי כדי שיוכל לתפקד ביעילות בנפילת המשקולת בפעם הבאה.

המשטח המיוחד משול כאן לעצם. המזרון הרך משול כאן לשרירים. לכן גם העצם זקוקה לתכונה "קשיחות לתוספת מעיכה". את התכונה הזאת מעניקה לעצם הרקמה הבסיסית שלה המורכבת מחסוסי חוטי שהוא שילוב של סחוסי שקוף למחצה ורך עם סיבי קולאגן המקשיחים אותו. כך מתקבל חומר עכור-מט שהוא הבסיס ממנו מורכבת העצם. (ראה למשל באנציקלופדיה העברית ערכים "חסוסי" ו"עצם"). כפי שרואים בטבלת ההתאמות שלי מדובר כנראה לי ב"צבע" אינפרא-אדום עכור-מט בעל התכונה המכנית "קשיחות לתוספת מעיכה" ובעל התכונה החומנית "קרינת עודף חום". לחומר חסוסי-חוטי זה של העצם נוסף חומר סידיני לבן. עד כמה שאני מבין, החומר הסידיני מקנה את החלליות הרבה בתאי העצם, דבר התורם לתכונת האלסטיות למעיכה. גם גיר לבן המשמש לכתובה על הלוח מורכב מחומר סידיני לבן אשר תכונות הפריכות שלו נובעות למעשה מהחללים הגדולים יחסית בתוך המבנה הגבישי של אבן הסייד. בטבלת ההתאמות שלי הצבע הלבן הוא בעל התכונה המכנית "אלסטיות לתוספת מעיכה" והתכונה החומנית "בידוד תוספת קור". שתי תכונות אלו קיימות למיטב הבנתי בעצם. כאשר רמת הסיידן בעצם פוחתת קטנה התכונה "אלסטיות לתוספת מעיכה" ועקב כך מכות חוזרות בעצם גורמות לשבירתה. למיטב הבנתי, זאת אחת הסיבות העיקריות אצל אנשים מבוגרים לשבירת העצמות משום שקצב יצור הסיידן בעצמות פוחת עם השנים וכל מכה בעצם מגדילה את הסיכוי שבמכה הבאה תתבצע שבירה. אם אני צודק בקביעתי שהצבע הלבן תואם לתכונה החומנית "בידוד מעודף קור" הרי שירידת רמת הסיידן בעצמות של אנשים מבוגרים גורמת גם לירידה ביכולת "בידוד מעודף קור" של העצם. במקרה כזה הייתי מצפה שקור חזק יחדור אל תוך החלק המרכזי של העצם, מח העצם, שם נוצרות כדוריות הדם האדומות. הדבר עשוי לפגוע בתפקוד מח העצם ולהקטין את קצב יצור כדוריות הדם האדומות. אין בידי כרגע מידע באיזו מידה קשור מחסור בסיידן בעצמות עם מחסור בכדוריות אדומות, אך רצוי לשים לב לאפשרות חשובה זאת. קראתי לאחרונה בעיתון שדלקת מפרקים מלווה באנמיה. האם גם הפחתה בכמויות הסיידן בגוף גורמת להפחתה בקצב יצור הכדוריות האדומות. אם אין על כך עדיין תשובה בחקר הרפואה, הייתי מציע לבדוק נקודה זאת.

ד) **הגחון של יונקים הרובצים על גחונם** הוא לבן. אין ספק שמשקל הגוף גורם למעיכה של פרוות הגחון. כאשר היונק קם מרצו חשוב שפרוות הגחון תשוב למצבה המקורי. כמו כן, לעיתים קרובות הקרקע עליה רובץ היונק קרה יחסית לסביבה. בעיקר כאשר הרביצה היא בצל במהלך היום, ובוודאי במשך הלילה. לכן יש צורך שלפרוות היונק הנוהג לרבוץ על גחונו תהינה התכונות "אלסטיות לתוספת מעיכה" ו"בידוד מעודף קור" המתואמים אצלי לצבע לבן. יושם לב שגחונם של יונקים שאינם רובצים על גחונם, כגון הפיל, הג'ירף והקרנף אינם לבנים.

ה) **נוצות לבנות** אצל העופות עשויות להצביע על שתי התכונות המותאמות אצלי ללבן: "אלסטיות לתוספת מעיכה" ו"בידוד מעודף קור". על תחתית הכנף הטופחת באויר בעת התעופה יש מאמצי מעיכה עקב דחיפת האויר כלפי מטה. בעת שהכנף עולה יש מאמצי מעיכה על החלק העליון של הכנף. אי לכך, כמו בעצמות, יש חשיבות לשתי התכונות המכניות: "קשיחות לתוספת מעיכה" המוקנית על ידי החומר הקרטיני בצבע עכור-מט (אינפרא אדום- עכור מט) שממנו בנויים חלקי הכנף, ובעיקר המוט המרכזי, ו"אלסטיות לתוספת מעיכה" המוקנה על ידי הסיידן הלבן, כפי שראינו בדיון הנ"ל על עצמות. אלא שבנוצות, ובעיקר בנוציות, חשובה יותר התכונה של האלסטיות ולכן הצבע הלבן מודגש יותר. את התכונה החומנית המותאמת ללבן "בידוד מעודף קור" ניתן להבין בכנף הלבנה בכך שתוך כדי התעופה נוצרות מערבולות בין הנוציות של הנוצה. מערבולות קשורות אצלי לקור, כפי שהוסבר בפרק ד' בנוגע

לצבע כחול. עודף קור עשוי להקשיח את הנוצית ולמנוע את האלסטיות הדרושה בה. מכאן החשיבות לתכונה החומנית של לבן בנוציות הלבנות. אנו נראה בפרק הבא, הנוגע לדוגמאות לצבע שחור, שבמקרים מסוימים חשובות בכנפיים דווקא התכונות המותאמות אצלי לצבע שחור. אין בדוגמאות אלו כדי לסתור את הצורך בתכונות המותאמות לצבע הלבן במקומות האחרים.

## פרק ח - דוגמאות בחי לשחור

### שחור-לילה

**דוגמאות בולטות בחי לתכונות הפיסיקליות המותאמות לצבע שחור-לילה: תכונה מכנית: "קשיחות לתוספת מתיחה". תכונה חומנית: "בידוד מעודף חום":**

להלן נתייחס לשחור-לילה במינוח המקוצר "שחור".

#### **א) פרפרים**

בפרפרים רבים רואים בברור פסים כהים ולעיתים קרובות ממש שחורים בשפת הכנפיים. ראה דוגמאות בולטות בכנפי הפרפרים הבאים (ראה ב"מדריך החרקים בישראל" של פנחס אמיתי ו"פרפרי ארץ ישראל" של יצחק איזנשטיין): **זנב סנונית מצוי** (*Papilio machaon*), **נמפית הקטלב** (*Charaxes jesus*), **דנאית תפוח סדום** (*Danaus chrysippus*), **לבנין התלתן** (*Colias crocea Fourc.*), **נמפית החורשף** (*Vanessa cardui cardui* L.), ועוד. כאשר הכנף מתנופפת נוצרות מערבולות קצה בשפת הכנף. למשל כאשר הכנף יורדת יש עודף לחץ בצד התחתון ותת לחץ בצד העליון של הכנף. כתוצאה מכך חלק מהאוויר בחלק התחתון עוקף את שפת הכנף ועולה מעליה בצורת מערבולת, כמו גל גדול הנשבר בים. מערבולות כאלו יוצרות בין היתר מאמצי מתיחה על קצה הכנף. אם שפת הכנף לא תהיה מחוזקת דיה, היא תקרע ותעופת הפרפר תפגם. דוגמא יפה לקריעה של קצות משטח המתנופף ברוח רואים בדגל החשוף לרוחות חזקות לאורך זמן. כדי למנוע את הפגיעה בשפת הכנף רצוי שיהיה לו תכונה פיסיקלית "קשיחות לתוספת מתיחה". זאת התכונה המכנית שהתאמתי לצבע שחור-לילה, או ליתר קיצור כאן - שחור. יצויין שלא אצל כל הפרפרים קיימים פסים כהים בשפות הכנפיים. יש גם פסים בצבעים אחרים המשרתים מטרת פיסיקליות אחרות, כפי שניתן לראות בפרקים הקודמים. אני מניח שבמקומות שיש כתמים שחורים יש צורך מיוחד לתכונה "קשיחות לתוספת מתיחה". אני מניח שאותם אזורים פעילים יותר בעת התעופה. לאישור השערה זאת דרוש מחקר שטח מקיף. מה לגבי התכונה החומנית. בעת עליית הכנף נדחף האוויר שמעליה וזורם דרך השפה. מהירות הזרימה תלויה בגורמים רבים שלא אדון בהם כאן. מה שסביר הוא שזרימת האוויר גורמת לחיכוך עם הכנף. כתוצאה מהחיכוך מתחממים חלקים בכנף. בשפת הכנף הזרימה היא החזקה ביותר ולכן גם החיכוך וההתחממות הנלווית לו גבוהים ביותר. אם בחלק מסוים לא רצוי שהחום יכנס לתוך הכנף, רצוי שתהיה לאותו חלק תכונה חומנית "בידוד מעודף חום". זאת התכונה החומנית שהתאמתי לשחור.

כתמים שחורים מופיעים גם במקומות אחרים בפרפרים. בכל מקום כזה ניתן למצוא הסבר מדוע דווקא שם דרושות התכונות "קשיחות לתוספת מתיחה" ו"בידוד מעודף חום". אין כאן די מקום להסביר כל כתיב וכתם. אך אתן שתי דוגמאות בולטות. בפרפר **דנאית תפוח סדום** (*Danaus chrysippus*) מצויים מספר כתמים שחורים בצד העליון של הכנפיים האחוריות, בדיוק באזורי ההתפצלות של עורקי הכנף. הדבר עשוי להצביע על כך שדווקא באזורים אלה קיימים מאמצי מתיחה גדולים מאשר באזורים הסמוכים להם. יש פרפרים שאצלם הפתרון יכול להיות עיבוי הכנף שם או חיזוקי מבנה אחרים. אך שיטות אלו כרוכות בתוספת גדולה של משקל ואנרגיה בנייה. פשוט יותר למשל להוסיף שם תאי מלינין שחורים בעלי התכונות הנ"ל המותאמות לשחור כדי למנוע קריעה מכנית וחדירת חום פנימה.

הדוגמא השניה הן הטבעות הקונצנטריות השחורות בצד התחתון של הכנפיים של **סטירית היבלית** (*Lasiommata maera*). (ראה תמונה נהדרת (215) בספרו הנ"ל של איזנשטיין). בתוך הטבעת הפנימית קיים צבע לבן. בין הטבעות האחרות קיים צבע צהבהב. כל זאת על רקע צבע קרם חיוור. נוכחים שכל מכלול טבעות כאלה מצוי בין צלעות ושקוטר מרבית המכלולים הללו מותאם יפה בהתאם

לרוחב החלק שבין העורקים. לי כפיסיקאי נראה שטבעות אלו נועדו להגן על הכנף בפני מגוון רחב של אפשרויות מכניות. העיגול הלבן במרכז מרמז על "אלסטיות לתוספת מעיכה". הטבעות השחורות מרמזות על "קשיחות לתוספת מתיחה". הטבעות הצהובות מרמזות על "קשיחות לתוספת גזירה". תכונות אלו מאפשרות לי להציע את ההסבר הבא. הבה נדמיין את כנף הפרפר הזה בשעת מעוף ונסה להתרכז במכלול הטבעות הגדול במרכז הכנף. כאשר הכנף יורדת דוחף הצד התחתון שלה אויר כלפי מטה. האויר בקצות הכנף בורח דרך השפה. אך ככל שמתקרבים למרכז הכנף יותר אויר נלכד שם והלחץ שלו על תחתית הכנף גדול יותר. רצועת מעטפת הכנף שבין שני עורקים עשויה להתנפח במקצת בעת ירידת הכנף כלפי מטה. על פי מיקום הצבע הלבן במרכז מכלול הטבעות, אני מניח שבנקודה זאת לחץ האויר על תחתית הכנף הוא מירבי, ביחס ליתר חלקי הרצועה. אי לכך בנקודה זאת קיימת מעיכה של קשקשי הכנף. כאשר הכנף מתרוממת המעיכה נפסקת ואותו אזור מרכזי צריך לשוב למצבו המקורי כדי לתפקד היטב גם בירידה הבאה של הכנף. מכאן הצורך של מרכז מכלול הטבעות לתכונה המכנית "אלסטיות לתוספת מעיכה" המותאמת אצלי לצבע לבן. כאשר העיגול הלבן במרכז נמערך, בשעת ירידת הכנף, גורם הדבר לתוספת מתיחה של האזור שמסביב לעיגול. למניעת קריעת הכנף באותו אזור דרושה התכונה המכנית "קשיחות לתוספת מתיחה". תכונה זאת מותאמת אצלי לשחור. הטבעת השחורה מסביב לעיגול הלבן עונה על הצורך לתכונה מכנית זאת. תוך כדי מאמצי המתיחה בהם מצוי החלק הטבעתי הפנימי השחור, נוצרים גם מאמצי גזירה בסביבות הטבעת. זאת משום שכנראה השכבה הפנימית יותר של הכנף אינה מצויה באותם מאמצי מתיחה של השכבה החיצונית (של הצד התחתון של הכנף) ולכן שתי השכבות נעות זאת ביחס לזאת ועשוי להתהוות חיכוך ביניהן, דבר העלול לפגוע בתפקודן. כדי להקטין למינימום את נזקי החיכוך נחוצה התכונה המכנית "קשיחות לתוספת גזירה". תוספת הצבע צהוב בטבעת הסמוכה לשחור עונה על דרישה זאת. הטבעת הכהה השניה היא בצבע חום שהוא שילוב של שחור, אדום וצהוב (ראה בטבלת ההתאמות שלי - טבלה 1). על תפקידי השחור והצהוב עמדנו. כזכור, לצבע אדום מותאמת אצלי התכונה המכנית "אלסטיות לתוספת כיפוף". תוספת הצבע האדום (בצבע החום) מרמזת שקיים באותה טבעת חומה גם כיפוף מסוים. הטבעת הצהובה החיצונית רחבה יותר מהטבעת הצהובה הפנימית. לא מן הנמנע שתוספת הכיפוף בטבעת החומה מביא לכך שתחום גדול יותר סביב הטבעת החומה מצוי במאמצי גזירה. בדומה לכך ניתן להסביר גם את הטבעת החומה החיצונית. לאור ההסברים הללו ניתן לדמיין עתה את הדינמיות המגוונת של כל הרצועות בתחתית כנף הפרפר הזה בעת ירידת הכנף כלפי מטה. אנו רואים כיצד מאפשרות ההתאמות של התכונות הפיסיקליות לצבעים להסביר את הדינמיקה הנפלאה של כנפי הפרפר.

## ב) כיסויים שחורים

קיימים בעלי חיים רבים אשר הכיסוי שלהם שחור כולו או ברובו כגון חרקים שחורים במדבר, יונקים יבשתיים בעלי פרוות שחורות, יונקים ימיים בעלי עור שחור, דגים בים הפתוח, ציפורים מדבריות שחורות ועוד. בכל אלו קיימים מאמצי מתיחה מסיבות שונות, פנימיות וחיצוניות, ובכל אלו דרושה התכונה המכנית "קשיחות לתוספת מתיחה". כל אלו זקוקים גם לבידוד בפני עודף חום. לגבי בעלי החיים במדבר הדבר ברור. לגבי בעלי חיים בים אבהיר כי ככל שהמהירות גדלה כן גדל החיכוך עם המים. חיכוך מביא ליצירת עודף חום, ביחס לסביבה. כאמור, מה שחשוב לגבי התכונות הפיסיקליות הן הרמות היחסיות. חימום העור עקב חיכוך במים יחסי לטמפרטורת העור בהיות אותו בעל חיים ימי במנוחה. עבורנו אולי לא מדובר בטמפרטורות גבוהות. אך עבור לווייתן בעל שכבת שומן עבה חשוב מאד שהיא לא תתחמם ולו במקצת מעבר לגבול הנורמלי, המותאם לכל סוג ופרט. כך גם לגבי דגים בים הפתוח, להבדיל מדגים בשוניות האלמוגים אשר אצלם הדינמיקה שונה לחלוטין. לאור כל זאת חשובה אצל בעלי החיים הללו התכונה החומנית "בידוד מעודף קור" המותאמת אצלי לצבע שחור.

## ג) קצות כנף שחורות

אצל סוגי עופות רבים קצות הכנפיים שחורות. למשל אצל החסידה הלבנה (*Ciconia ciconia*), הכנף עצמה ברובה לבנה אך קצות הכנפיים שחורות. גם כאן, כמו בהסבר הנ"ל אצל הפרפרים, כאשר הכנף מתנופפת נוצרות מערבולות קצה בשפת הכנף. למשל כאשר הכנף יורדת יש עודף לחץ בצד התחתון ותת לחץ בצד העליון של הכנף. כתוצאה מכך חלק מהאויר בחלק התחתון עוקף את שפת הכנף ועולה מעליה בצורת מערבולת, כמו גל גדול הנשבר בים. מערבולות כאלו יוצרות בין היתר מאמצי מתיחה על קצות הכנף. אם שפת הכנף לא תהיה מחוזקת דיה, היא תקרע ותעופת העוף תפגם. כאמור, דוגמא יפה

לקריעה של קצות משטח המתנופף ברוח רואים בדגל החשוף לרוחות חזקות לאורך זמן. כדי למנוע את הפגיעה בשפת הכנף רצוי שיהיה לו תכונה פיסיקלית "קשיחות לתוספת מתיחה". זאת התכונה המכנית שהתאמתי לצבע שחור. מה לגבי התכונה החומנית. גם כאן, כמו אצל הפרפרים, בעת עליית הכנף נדחף האויר שמעליה וזורם דרך השפה. זרימת האויר גורמת לחיכוך עם הכנף. כתוצאה מהחיכוך מתחממים חלקים בכנף. בשפת הכנף הזרימה היא החזקה ביותר ולכן גם החיכוך וההתחממות הנלווית לו גבוהים ביותר. אם בחלק מסוים לא רצוי שהחום יכנס לתוך הכנף, רצוי שתהיה לאותו חלק תכונה חומנית "בידוד מעודף חום". זאת התכונה החומנית שהתאמתי לשחור. כמובן שיתכנו סיבות אחרות העשויות לגרום לחמום הכנף, כגון קרני השמש או אזור חם במיוחד. לכן בציפורים הנוהגות לשהות זמן רב בדאיה, הגחון והחלק התחתון של הכנפיים לבנות כדי לבודד בפני עודף קור. אך הצד העליון של הכנפיים שחור כדי לבודד מעודף חום. במדריך הציפורים של היינצל, פיטר ופרסלאו, המוזכר בפרקים קודמים, ניתן לראות סוגים רבים של ציפורים כאלו. למשל, אלבטרוסים, יסעורים, סולות, חסידות, חופמאים גדולים, שחפים, אלקות, סלעיות, ועוד.

### עורבים שחורים

העורבים השחורים (עמ' 308-309 במדריך הציפורים הנ"ל), הם דוגמאות בולטות לציפור אשר כולה שחורה, הגוף, הכנפיים בשני הצדדים, המקור, הזנב ואפילו הרגליים.

הזן הנפוץ ביותר הוא **עורב שחור** (*Corvus corax*). על פי המפה במדריך הנ"ל המתייחס לציפורי אירופה והמזרח התיכון, העורב השחור יציב בכל עונות השנה במרבית אירופה. על פי המדריך הנ"ל: "מעופו כבד למדי, לעיתים קרובות דואה. באביב עורך להטוטי תעופה מרשימים של גלגולים, תעופה במהופך וצלילות. הילוכו הדור... בית גידולו נופים גלויים הרריים, החל מהטונדרה וכלה בחוף-ים ומדבר. שכיח בצוקי-חוף, וביערות ומצוקים בצלעות הרים. מקנן בדרך כלל על דרגש-סלע, אך לפעמים גם בעץ. בין העופות המקדימים לקנן. 64 ס"מ. (בישראל: יציב נדיר בצפון הארץ ומרכז. מקנן בצוקים)".

זן אחר בו נתקלתי רבות בדרום הארץ הוא **עורב חום-עורף** (*Corvus ruficollis*). על פי המדריך: "עורב מדבר. יש חוקרים הרואים אותו כזן מדברי של העורב השחור. הגוון השחמחם של הצוואר והעורף נראים בשדה רק מקרוב ובתנאי אור טובים. בצעירים חסר הגוון החום עד לנשירת הנוצות בסתיו הראשון. הצבע החום ניכר יותר משמתבלה לבוש הנוצות. מקורו אינו עבה כמקורו של העורב השחור. ... בצפון אפריקה מוגבלת תפוצתו בעיקר לערבות לענה, והוא מקנן על עצי השיזף המצויים בהן. 50 ס"מ. (בישראל: יציב מצוי באזורים מדבריים. מקנן במצוקים ועצים)".

זן נוסף: **עורב קצר זנב** (*Corvus rhipidurus*). על פי המדריך: "עורב שהוא שחור כולו, וניכר בזנבו הקצר, ובצלליתו העטלפית בשעת מעופו. המקור מגושם, קצר משל העורב השחור, ובבסיסו זיפים זקופים הנראים רק מקרוב. יש שהוא מקבל גוון שחום של ארד, אלא שעל פי זנבו ומקורו ניתן תמיד להבדיל אותו מחום העורף. ... נוהג להלך במקור פתוח, כאילו הוא נושם בכבדות. בית גידולו מצוקים וסלעים, לעיתים בקרבת ישובים (כגון אילת). מקנן בעצים, מצוקים וסלעים. 47 ס"מ. (בישראל: יציב מצוי בקרבת מצוקים לאורך שקע הערבה, ובדרום סיני. בחורף נראה גם בסביבות ירושלים. מקנן במצוקים)".

בכל שלושת הזנים, ובעיקר בשני האחרונים, ברור שמדובר בזני ציפורים המותאמות לאזורים בקרבת הקרקע, הסלעים והצוקים החשופים לשמש. לכן אותן ציפורים סופגות חום לא רק משהשמש באופן ישיר אלא גם מהחזרות הקרינה מהקרקע. בכך ניתן להסביר את היותן שחורות לא רק בחלק העליון אלא גם בחלקים התחתונים כולל בגחון ובצד התחתון של הכנפיים. יתרה מכך, מאחר והסלעים באזורים הפתוחים הם שחורים, הם קולטים את כל קרינת השמש, כולל הקרינה האולטרה סגולה. מאידך הסלעים פולטים את האנרגיה הנקלטת (בשיווי משקל תרמי) על ידי קרינת חום, כפי שכל אחד שהיה במדבר ועמד על סלע חש זאת. כלומר, החלקים התחתונים אינם חשופים לקרינה אולטרה סגולה ולמרות הכל הם שחורים. אולם הם חשופים לעודף חום וכדי לבודד את גופם מעודף חום צבעם



שחור. בכך אני רואה הוכחה תצפיתית לכך שהשחור אינו נועד רק למניעת חדירה של קרינה אולטרה סגולה לגוף, כפי שמקובל במדע כיום, אלא גם ובעיקר למניעת חדירת חום לחלקים הפנימיים. היה מי שהביע תמיהה על כך שאני מייחס לצבע השחור תכונה חומנית של "בידוד עודף חום". אני סבור שדוגמא זאת של העורבים השחורים יש בה כדי להמחיש את התכונה הזאת. יתרה מכך, נמסר לי בעל פה לפני כ-11 שנים, כאשר התחלתי לדון עם זואולוגים בנושאים אלה, שנעשה מחקר זואולוגי על מידת הבידוד מחום בכנף של עורב שחור ונמצא שאכן הטמפרטורה בתוך הכנף נמוכה במידה ניכרת מאשר הטמפרטורה על הכנף. אקווה לאתר את המחקר ההוא ולהביא ציטוטים ממנו. לא מן הנמנע שנעשו מאז מחקרים נוספים. אבדוק את העניין באמצעות האינטרנט.

יש לי נימוק פיסיקלי מדוע ניתן לצפות שהמלנין השחור יבודד חום: כידוע, גרנולות המלנין השחורות מורכבות משכבות רבות של גבישים שקופים וארוכים המונחים זה על גבי זה בצורה לא מסודרת. בגלל שאין אחידות בין המרווחים של השכבות - כל אורכי הגל נקלטים בגבישים עקב החזרות פנימיות רבות ואין גל מסוים, בתחום הנראה, המוחזר החוצה. זאת הסיבה האופטית לצבע השחור. אולם התאור הזה של גבישים קשור לכך שבין הגבישים יש מרווחים קטנים המכילים נוזל שקוף, אולי על בסיס של מים או תמיסה המכילה בעיקר מים. מים כידוע הם בעלי מקדם העברת חום נמוך. (החום במים באמבטיה למשל עובר ממקום למקום בדרך של הסעת חום, ולא בדרך של הולכת חום). לכן, גם אם הגבישים העליונים בגרנולה מתחממים עקב החום החיצוני, עדיין יש הרבה שכבות בידוד המפרידות בינם לבין הגבישים הפנימיים ביותר. לכן אני מצפה שהטמפרטורה של הגבישים הפנימיים ביותר תהיה נמוכה במידה ניכרת מאשר הטמפרטורה של הגבישים העליונים. זאת דוגמא לקשר בין צבע למקדם הולכת חום.

## פרק ט' - דוגמאות בחי לאולטרה-סגול

הערה: ראה הסברים על אולטרה-סגול בפרקים ב' וג'. בנוסף להערותי שם אוסיף כאן הערה חשובה. במדע מקובל כיום שהצבעים הנראים מתקבלים משילוב של שלושה צבעי יסוד, למשל אדום, ירוק וכחול. בהתאם לכך מתארים את הצבע הסגול כשילוב של כחול ואדום בכמויות מתאימות. אני סבור שבטבע המציאות שונה. לדעתי, כפי שהצהוב מתקבל משילוב של הצבעים בשני צדדיו, מבחינת הספקטרום, ירוק ואדום, וכך גם יתר הצבעים שבין אדום וכחול, (כתום - שילוב של צהוב ואדום וכו'), כך גם הסגול מתקבל לדעתי בטבע משילוב של כחול ואולטרה סגול. העובד שאנו בני האדם איננו רואים אולטרה סגול אינה אומרת שעלינו לעוות את המציאות בטבע. לו הדבורה היתה יכולה לספר לנו מהם שילובי הצבעים הנראים לה, לדעתי היא היתה אומרת שהסגול הוא שילוב של כחול ואולטרה סגול. היא בכלל לא היתה מבינה על מה אנו מדברים כאשר אנו אומרים צבע אדום.

התאמת תכונות פיסיקליות לשקוף-אולטרה סגול (שקוף מבריק):

תכונה מכנית: "אלסטיות לתוספת מתיחה" (צמיגות). תכונה חומנית: "שימור עודף קור".

### **(א) קורים**

קורי עכביש וקורים של זחלים הם שקופים-מבריקים. את התכונה "אלסטיות לתוספת מתיחה" של קורי העכביש, דומני שמיותר להסביר. כפי שהראו מדידות שונות קורי עכביש עשויים להגיע ליכולת החזקת עומס פי שבע מחוט פלדה באותו עובי. כאשר יצור נלכד ברשת העכביש ומרעיד אותה הוא גורם למאמצי מתיחה. יש חשיבות רבה לכך שמיד לאחר השתלטות העכביש על קורבנו תשוב הרשת למצבה המקורי. לכן דרושה האלסטיות החשיבות לחזרה למצב המקורי של הרשת כה גדולה עד שאם הקורבן גרם חלילה (מנקודת מבטו של העכביש) לקריעת הרשת ידאג העכביש לתקן אותה בהקדם האפשרי. בסרטי טבע מראים מידי פעם כיצד עכבישים מסוימים, דומני במדגסקר, צדים את טרפם על ידי

השלכת קור ארוך ודביק בקצהו לעבר הקורבן העובר מתחת לענף. שם, ללא ספק, ברורה תכונת האלסטיות. לגבי התכונה החומנית: "שימור עודף קור", ניתן להסיק אותה מכך שטיפות הטל הנלכדות ברשת עשויות להשמר אפילו עד לשעות אחר הצהריים ביום חם, כפי שלא פעם נוכחתי בתדהמה בשדה יבש באביב כאשר הקורים הרבים של זחלי הפרפר לבנין הכרוב נצצו כמו יהלומים קטנים בגין החזרי השמש מאותן טיפות לכודות. אין לי ספק כי אם לא היתה בקורים אלה התכונה "שימור עודף קור" של הלילה, היו עגלי הטל הללו נמוגים עוד בשעות הראשונות של הבוקר.

## ב) פרפרים

אצל מרבית מהפרפרים החלק העליון של הכנפיים מבריק. אצל הפרפרים הכנפיים בעיקרן שטוחות. כל נפנוף כנף גורם ללחצים על שפתה הנובעים ממערבולות שיוצרת תנועת השפה ביחס לאויר. לחצים אלה גורמים למתיחה מסוימת של חלקי הכנף בעיקר במשטחים שבין עורקי הכנף. כדי שהכנף תחזור לצורתה המקורית מיד עם הפסקת הנפנוף נחוצה התכונה המכנית "אלסטיות לתוספת מתיחה".

מה לגבי התכונה החומנית. ההסבר שאני מציע כאן הוא כדלהלן. כאשר כנף הפרפר יורדת כלפי מטה נוצרים מעל חלקה העליון מערבולות. מערבולות אויר ידועות באווירודינמיקה כגורמות להפחתת הלחץ מעל הכנף ולמעשה נותנות לכנף עילוי כלפי מעלה. זה למעשה מה שמאפשר לפרפר לעוף למרות הכנף הגדולה יחסית לגוף. הכנף היורדת בגין כוח הכובד עולה בגין משיכת המערבולות. לכן שרירי הפרפר אינם צריכים להרים את הכנף הגדולה יחסית. דומני שאני מתקן כאן את אחת מטעויות היסוד של המדע בכל הנוגע לתעופת פרפרים ועופות. את מרבית העבודה של הרמת הכנף בעת התעופה עושה האווירודינמיקה ולא השרירים. השרירים נועדו בעיקר להתחלת המעוף כדי להשיג מהירות טיסה המאפשרת היווצרות מערבולות מספיק חזקות, בנחיתה ובפניות. בכל יתר התפקודים של התעופה לוקחת חלק בעיקר האווירודינמיקה. הסבר כללי זה מסביר את המבנה המיוחד של הנוצות האווירודינמיות בעופות העוזרות בתהליך התעופה עצמו. כמו כן יש בכך כדי לתת הסבר כללי לצורות האווירודינמיות הנפלאות והמיוחדות של כנפי פרפרים, המעוצבות על פי צורכי התעופה המיוחדים לכל סוג, זן וזוויג.

כמוסבר בהערות לטבלה בנוגע למושג "קור", על פי תיאוריה חדשה שלי - משמעותו של הקור היא קיום מערבולות ולהיפך - קיום קור משמעותו קיום מערבולות. לכן, להערכתי, המערבולות הנוצרות על החלק העליון של כנף הפרפר כאשר היא יורדת גורמות לקרור שכבת הכנף העליונה. כאשר הכנף מתרוממת חזרה הוא דוחף את האויר שמעליו וזה זורם לצדדים דרך שפת הכנף, בכיוון המשטחים שבין העורקים. לכן נוצר שם חיכוך של משטח הכנף עם האויר המתפזר. במקרה כזה אמורה הכנף להתחמם בשל חיכוך. חימום הכנף עלול לגרום להתפשטותה עקב חום. דבר כזה עלול לגרום לאי יציבות התנועה כאשר משטח הכנף משתנה ללא הרף ובאופן שרירותי (מידת החיכוך תלויה בגורמים רבים שאינם בשליטת הפרפר). כדי למנוע את התחממות החלק העליון של הכנף רצוי שהקור אשר נוצר בשכבה העליונה בעת הירידה ישמר לשעת העליה. לכן אנו מקבלים הסבר ראשוני לחשיבות של התכונה החומנית "שימור עודף קור", אשר בא לידי ביטוי צבעוני בצבע השקוף-אולטרה סגול (שקוף-מבריק) המתווסף לצבעי הכנף. יצויין שבפרפרים רבים רק הצד העליון מבריק. ההסבר כאן לגבי החשיבות של "אלסטיות לתוספת מתיחה" ו"שימור עודף חום" המותאמים אצלי ל"צבע" מבריק-אולטרה סגול, מסבירים את הברק המיוחד בחלק העליון של מרבית הפרפרים.

קיומן של לפחות שתי שכבות בכנפי הפרפרים, שכבה עליונה ושכבה תחתונה, כאשר לכל שכבה יש תכונות פיסיקליות שונות מאפשר גיוון רב בצורות הכנף כולה ובתפקודה בתנאים שונים של טמפרטורה, לחות, צפיפות אויר, רוחות, קרינת שמש ועוד. הדבר נכון לא רק לגבי הכנף בכללה אלא גם לגבי כל חלק וחלק של הכנף. מכאן מובן בעיקרו המגוון העצום של צבעי הפרפרים וקיומם של צבעים שונים בחלקי כנף שונים. למשל די אם נניח קיומן של שלוש דרגות (חזק, בינוני וחלש) לכל אחד מחמשת התנאים הללו כדי לאפשר לכל צד בכל חלק לקבל אחד מ-243 (3 בחזקת 5) צבעים משולבים.

## ג) מקור ציפורים

לציפורים רבות מקורים מבריקים. המקור משמשת את הציפור כמכשיר עיקרי למשיכת המזון מהסביבה אל תוך גרונה של הציפור. פעולות אלו עשויות למתוח במקצת את המקור. חשוב שמיד לאחר סיום פעולת המשיכה של המזון יחזור המקור למצבו שלפני הפעולה. מכאן החשיבות של התכונה המכנית "אלסטיות לתוספת מתיחה" המותאמת אצלי ל"צבע" "שקוף + אולטרה סגול". התכונה החומנית "שימור עודף קור" עשויה למנוע חימום יתר של המקור בעת פעולת המשיכה של המזון פנימה, פעולת הגרמות בוודאי לחיכוך של המקור עם המזון עצמו.

#### ד) שיער מבריקה

שערות רבות הן מבריקות. הדבר אינו מחוייב המציאות שכן הן יכולות בעיקרון להיות בצבע מט. את תוספת הברק לשערה אני מסביר בכך שהיא מצויה במאמצי מתיחה בגין הפעלת כוח חיצוני על השערה, כגון רוח חזקה, או חיכוך עם גוף כלשהו (מסרק למשל אצלנו, עץ אצל חיות מסוימות וכו') חשוב שלאחר הסרת הכוח תחזור השערה לאורכה המקורי. אנו נוהגים לגזוז את שערותינו. לכן אין לנו תחושה לגבי התופעות העשויות לנבוע משינוי אורך השערות. כדי להבין את החשיבות נדמיין שהשערות על ראשו של קוף הן בדיוק באורך המאפשר להן להגיע עד סמוך לעיניים אך לא להסתירן. אם השערות יתארכו מעבר לגבול מסוים תופרע הראיה של הקוף. זאת רק דוגמא אחת העולה במוחי עתה. מחקר יכול לבדוק חשיבות אורך השערות במקרים נוספים. כדי שהשערה תשוב לאורכה המקורי חשובה התכונה המכנית "אלסטיות לתוספת מתיחה". גם שימור עודף קור עשוי לעזור לשמירת אורך השערה, למשל בשעה שהיא עוברת מרוח קרה לשמש החמה העשויה להשפיע על התפשטותה. מכאן הצורך בתכונה החומנית "שימור עודף קור" אצל השערה המבריקה.

#### ה) צפרדעים

העור של צפרדעים רבות הוא מבריק, לא רק בגלל המים כאשר יוצרת הצפרדע מן הבצה, אלא אפילו אצל האילנית הירוקה כאשר היא רחוקה מהמים. בניגוד לזוחלים יבשתיים רבים אשר דרוש להם עור קשיח במקצת, כגון אצל זיקית, הרי שאצל הצפרדעים העור חייב להיות אלסטי למתיחה כדי לאפשר כניסה של נוזלים וגזים דרך העור. מכאן התכונה המכנית "אלסטיות לתוספת מתיחה" של העור המבריק. בעור בצפרדעים חשובה מאד התכונה החומנית "שימור עודף קור". זאת כדי שביצאם מהבצה לא יתייבש עורם מייד בגלל החום הסביבתי.

#### ו) סיכום לאולטרה-סגול

כל הדוגמאות הללו נוגעות לתופעה של גוון מבריק, אשר אני משייך אותו להמצאותה של קרינה אולטרה-סגולה הנובעת או מוחזרת מאותו חלק מבריק. הדברים לא נבדקו נסיונית ויש מקום לדעתי לבצע מחקר בנידון. יש למחקר כזה חשיבות רבה לתחומי חיים רבים הקשורים באופן ישיר או עקיף לצבעים. הייתי מציע לבדוק את השערתי ששילוב של אולטרה-סגול קרוב (אס"ק) עם כחול נותן סגול. בדיקה כזאת אינה מסובכת כלל, אך יש לבצע אותה תחת אילוצי מחקר מתאימים אשר לי אין את הכלים לבצעה. אם אני צודק, ואני מאמין שכן, הרי שניתן יהיה לקבל צבעים נראים שונים על ידי שילובם עם חומר מבריק המחזיר אולטרה-סגול קרוב. למשל, אני מצפה שערוב של אדום ואולטרה סגול קרוב יתן צבע מהתחום שבין כתום לכחול. בפרק הבא, הדין באינפרא-אדום קרוב (אא"ק), אעיר הערות דומות לגבי הקצה השני של הספקטרום. סך הכל, התבססות על חמישה צבעי יסוד: אס"ק, כחול-שמיי, צהוב-שמש, אדום-שקיעה ואא"ק, תפשט את כל הטיפול הנוגע לצבעים. במשך השנים פיתחתי שיטת חישוב פשוטה אשר יש לה נימוקים פיסיקליים. אביא אותה באחד הפרקים במהלך סדרת הפרקים הזאת.

מכל מקום, מה שחשוב לציין כאן הוא שאם אנו רואים בטבע צבע סגול אנו יכולים להסיק שהוא שילוב, בשקלול מסוים, של כחול-שמיי ואולטרה סגול קרוב (שקוף-מבריק) ולנתח את התכונות הפיסיקליות של אותו חלק סגול על פי התכונות הפיסיקליות, בשקלול המתאים, של שני הצבעים הללו.

## פרק י' – אינפרא אדום

**הערה:** בפרקים ב', ג' וט' הערתי מספר הערות לגבי המשמעות של אינפרא אדום (עכור-מט). כאן ברצוני להדגיש שהצבע אדום-כהה יתקבל משילוב של אדום-שקיעה ואינפרא אדום קרוב (אא"ק). "הצבע" אינפרא-אדום נראה על ידי בעלי חיים ליליים מסוימים כגון נחשים. יש לי חשד, שעדיין לא מצאתי לו ביסוס בספרות המקצועית, שגם חרקים ליליים נעזרים לראיה באינפרא-אדום קרוב. מה שגורם לי לחשוד בכך הוא מבנה העיניים המורכבות בשיטה הסופרפוזיציונית אצל בעלי חיים הפעילים בלילה (ראה אנצ' עברית ערך "ראות, ראייה" עמ' 397). (ראה שרטוט מפורט בפורום המדע של WALLA בקטגוריה "תמונות").

מכל מקום, עבור בעלי החיים המבוססים על ראייה באורכי הגל הארוכים (צהוב, אדום ולהערכתי גם אינפרא-אדום), משמש להערכתי האינפרא אדום כ"צבע" מוכר אשר שילוב שלו עם צבע הנראה לנו, בעל אורך גל מסוים, למשל צהוב, נותן צבע באורך גל ארוך יותר, כלומר קרוב לתחום האדום. ניתן לצפות גם שאור כחול ידחה אותם בדומה לכך שאותנו דוחים (מסנוורים) קרני השמש הישירות משום שהן מכילות גלים אולטרה-סגולים. כתגובה אנו עוצמים עיניים או מפנים את המבט לכיוון אחר.

### דוגמאות בחי לאינפרא-אדום (עכור-מט)

תכונות פיסיקליות: **תכונה מכנית:** "קשיחות לתוספת מעיכה". **תכונה חומנית:** "קרינת עודף חום".

### **דוגמאות בולטות מהחי.**

#### **(א) ציפורניים**

הציפורניים בידינו ורגלינו מורכבות מחומר קרני (קרטין) והן בצבע מט-עכור. את זאת ניתן לראות על פי החלק שנגזז מהציפורן. כלומר הן מחזירות, או קורנות, "צבע" אינפרא-אדום. לציפורניים תפקיד חשוב בתפקוד האצבע. היא מגנה על האצבע בעת מגעה עם משטח קשה ובעיקר בעת אחיזת מזון. את חשיבותה של הציפורן חשתי כאשר אחת מצפורני ידי נפגעה ובמשך זמן מה מחצית מהחלק המכוסה בדרך כלל על ידי הציפורן היה חשוף. כאשר החזקתי באותה אצבע בדבר מה חשתי כאב בשרירים שמתחת לאזור החשוף. זאת משום שלא היתה תמיכה נגדית למאמץ האחיזה והשריר באותו אזור התעוות במקצת. דוגמא זאת הבהירה לי את חשיבות התכונה "קשיחות לתוספת מעיכה" שיש בציפורן. לגבי התכונה החומנית "קרינת עודף חום" איני יודע אם נעשו ניסויים לבדוק את הנושא בציפורניים. אך נראה לי כסביר לצפות לקיום תכונה כזאת בקצות האצבעות כדי להפיג במהירות את החום כאשר קצה האצבע נוגע בדבר חם מידי. אני מעלה אפשרות זאת כאן לראשונה. כדי לאשש אפשרות זאת, מילאתי עתה כוס זכוכית דקה במים רותחים ונגעתי מבחוץ בזכוכית בו זמנית הן עם הציפורן של אחת האצבעות והן עם העור החשוף שבצד השני של הציפורן של אותה אצבע המצויה ביד השניה. אכן, החום בעור החשוף הורגש חזק מאד. לעומת זאת כמעט ולא הרגשתי חום בציפורן. כאשר מנתקים מגע מהכוס נוכחים שהעור החשוף עדיין חש בחום. לעומת זאת החום הקל שהורגש בשריר שמתחת לציפורן נמוג מיד. איני מתייחס לניסויים אלה כאל ניסויים מדעיים. לשם כך דרושים סטטיסטיקות אצל מספר רב של ציפורנים, באנשים שונים במצבים שונים וכו'. אך אני מניח שאת מה שאני חשתי יכול כל אחד לחוש בעצמו. אני רואה בכך תמיכה מסוימת בהתייחסות אל אינפרא-אדום (עכור-מט) כבעל תכונה חומנית "קרינת עודף חום".

נשים לב שכאשר אנו מסכלים על הציפורניים באצבעות היד אנו רואים צבע אדמדם במקצת הנובע מהשריר האדמדם שמתחת לציפורן. הדבר מצביע על כך שהציפורן שקופה במקצת. היא גם מבריקה. כלומר יש בה התכונות שקוף-מבריק המתאימות ל"צבע" אולטרה-סגול בו דנו בפרק הקודם, דהינו "אלסטיות לתוספת מתיחה" ו"שימור עודף קור". את חשיבות האלסטיות לתוספת מתיחה ניתן להבין מכך שבדרך כלל הציפורן גדלה ושימשה כנראה אצל הקדמונים גם לחפירה באדמה, ואולי גם בעצים, למציאת מזון. במקרה כזה היא עשויה להמתח במקצת ולכן חשוב שהיא תשוב למצבה המקורי לאחר השחררות מהגורם המותח. כדי לברר את התכונה החומנית "שימור עודף קור" בציפורן חזרתי על אותו ניסוי כנ"ל אלא שבמקום מים רותחים שמתי בכוס הדקה מי קרח. אכן, הציפורן התחושה היתה קרה יותר במגע של הציפורן מאשר במגע של העור החשוף באצבע התואמת ביד השניה. לאחר שניתקתי מגע מהכוס הקרה של שתי האצבעות נשארה תחושת הקור זמן רב יותר בציפורן מאשר בעור החשוף. לשם מה חשובה התכונה החומנית "שימור עודף קור" אצל הציפורן. אין לי עדיין תשובה חד משמעית על כך. אך ניתן להעלות אפשרות שהדבר בא למנוע שינוי סדקים בציפורן כאשר היא חשופה לקור ועוברת מיד לחשיפות לחום. שימור הקור מאפשר מעבר טמפרטורה הדרגתי של הציפורן מקור לחום ובכך נמנעים הסדקים. אם יהיו סדקים הציפורן לא תתפקד כראוי כמשען קשיח בקצה האצבע הנחוץ לאחיזת מזון.

(ב) **סחוס עכור בעצמות.** העצם זקוקה לתכונה "קשיחות לתוספת מעיכה". את התכונה הזאת מעניקה לעצם הרקמה הבסיסית שלה המורכבת מחסוחו חוטי שהוא שילוב של סחוס שקוף למחצה ורך עם סיבי קולאגן המקשיחים אותו. כך מתקבל חומר עכור-מט שהוא הבסיס ממנו מורכבת העצם. (ראה למשל באנציקלופדיה העברית ערכים "סחוס" ו"עצם"). כפי שרואים בטבלת ההתאמות שלי מדובר כנראה לי ב"צבע" אינפרא-אדום עכור-מט בעל התכונה המכנית "קשיחות לתוספת מעיכה" ובעל התכונה החומנית "קרינת עודף חום". לחומר סחוס-חוטי זה של העצם נוסף חומר סידני לבן התורם לתכונות הנוספות של העצמות: אלסטיות לתוספת מעיכה" ובידוד עודף קור". על כך דנתי בפרק הנוגע לצבע לבן.

תכונה מעניינת העולה מהדיון כאן היא האפשרות שקיימת בעצמות גם התכונה החומנית "קרינת עודף חום". איני יודע כרגע באיזו מידה הנושא נבדק. אני מניח שניתן לבדוק תכונה כזאת באמצעות גלאי אינפרא-אדום מיוחדים. אם אני צודק הרי שניתן יהיה לפתח מכשירי אבחון של צורת העצמות ומצבן בעזרת גלאי אינפרא אדום רגישים, אשר ידעו להבחין בין ספקטרום קרינת החום של צינוריות הדם, השרירים ויתר הרקמות הרכות, לבין ספקטרום קרינת החום של העצמות. מכשיר כזה עשוי למנוע את הצורך בצילומי רנטגן הדורשים מעבר הקרינה דרך הגוף עם הסיכון לפגיעה מצטברת בתאי הרקמות.

### ג) עמודי הנוצות

גם עמודי הנוצות (קולמוסים) מורכבים מחומר קרני (קרטין). עמודים אלה הם בדרך כלל ב"צבע" עכור-מט, אשר אני מקשר אותו לאינפרא-אדום עכור. את התכונה המכנית המותאמת אצלי ל"צבע" זה : קשיחות לתוספת מעיכה", דומני שמיותר להסביר. אם העמוד לא יהיה די קשיח למעיכה תתעקם הנוצה בעת התעופה ולא תמלא את תפקידה. התכונה החומנית "קרינת עודף חום" ניתנת להסברה בכך שבעת התעופה עשויים להתרכז באזור בסיס הנוציות המחוברות לקולמוס גושי אויר לכודים. גושים אלה צפויים להיות בטמפרטורה גבוהה יותר מאשר האויר המערבולתי הזורם בין הנוציות. כזכור, כדי להתגונן בפני הקור הנוצר ממערבולות אלו צבען של הנוציות לבן אשר לו הותאמה על ידי התכונה החומנית "בידוד מעודף קור" כפי שדנו בפרק על לבן. כלומר, גושי האויר בקרבת הקולמוס יהיו בטמפרטורה גבוהה יותר מאשר האויר לאורך הנוציות. לכן גושי אויר אלה יוסיפו חום לקולמוס, ביחס ליתר הנוציות. אי לכך יש צורך להקרין את החום כדי שהקולמוס לא ישנה את צורתו ועקב כך כל הכנף תשתנה, דבר אשר ישפיע אל אופן התעופה ויגרום במקרים

קיצוניים לחוסר יציבות בתעופה. מכאן אולי הצורך בתכונה "קרינת עודף חום" המותאמת על ידי ל"צבע" אינפרא-אדום עכורי.

## פרק יא - שינויי צבע בשועל השלג

באזור הקוטב קיים מספר קטן של סוגי בעלי חיים. זאת בשל התנאים הקשים הדורשים רמת הסתגלות גבוהה. יש סוגים שצבעם קבוע כל עונות השנה, כמו **הדוב הלבן**, ויש המשנים את צבעיהם בהתאם לעונות השנה. דוגמה בולטת רואים אצל **שועל השלג** (White Fox) (Alopex lagopus). פרק זה יוקדש להסבר הסיבות הפיסיקליות שבעטיין משתנים צבעיו.

### **א) אופן החיים, הצורה והצבעים של שועל השלג**

על פי נתונים באתר האינטרנט Lioncrusher's Domain - Arctic Fox (Alopex lagopus) שועל השלג הוא טורף קטן ממשפחת הכלביים. מידותיו: גובה: 25-30 ס"מ, אורך גוף 53-55 ס"מ, אורך הזנב: 30-31 ס"מ, משקל 3.2-4 ק"ג. פרוותו רכה מאד ועבה. היא ארוכה בהרבה בחורף מאשר בקיץ. לפרוותו יש ערך הבידוד הגדול ביותר בין היונקים. האוזניים קצרות מאד ומעוגלות. זנבו מעובה מאד ואורכו כמחצית מאורך גופו. כפות הרגליים שעירות. מטרת השערות, על פי אותו אתר, היא מניעת כוויות קור של כפות הרגליים. בתמונותיו רואים גם את הציפורניים החדות של הרגליים הבולטות מבין שערות הרגליים. את תמונותיו ניתן לראות למשל בארכיב של האתר הנ"ל. (כאשר אשיג רשות להשתמש בתמונותיו כאן אעשה זאת בהקדם). אפו שחור.

**תפוצתו כיום:** בטונדרה מסביב לציר הצפוני באזורים הארקטיים של אירופה, צפון אמריקה, איסלנד וגרנלנד. הוא והדוב הלבן נחשבים ליונקים היבשתיים הצפוניים ביותר. שועל השלג מסוגל להתקיים אפילו בטמפרטורות קרות עד מינוס 80 מעלות צלסיוס (על פי האנצ' העברית, ערך "שועל"). (בעבר הרחוק הוא הגיע גם למרכז אירופה, צרפת גרמניה שוויץ, על פי שרידים שלו שנמצאו שם).

**תפריט:** שועל השלג ניזון בעיקר מציד של מכרסמים, למינגים (מכרסמים קטנים ממשפחת הנברנים החיים במחילות תת קרקעיות ומצויים באזורים ארקטיים) (ראה ערכים "מכרסמים" ו"למינג" באנציקלופדיה העברית). כמו כן ניזון שועל השלג משאריות שהושארו על ידי הדוב הלבן, משאריות של ביזונים שנטרפו על ידי זאבים, מגוויות של סוסיים (בעלי הניבים העצומים) (Walrus) ומציפורניים חסרות כושר תעופה וביציהן. כלומר הוא מסתגל לסוגים שונים של מזון מן החי. הוא פעיל גם בחורף, אוגר את מזונו בבורות הנחפרים בקרח כדי לאכול לאחר מכן. קיימת התאמה רב שנתית בין מספר הלמינגים למספר שועלי השלג.

**מופע:** קיימים שני מופעים של שועל השלג: **מופע א'** נראה בעיקר בחורף. הוא לבן בחורף. לאחר הנשירה הוא חום בקיץ כאשר החלקים התחתונים בהירים יותר. (להן - "שועל שלג לבן"). **מופע ב'** נראה בעיקר בקיץ. הוא כחול-בהיר בחורף וכחול-אפורי בקיץ (להלן- "שועל שלג כחול"). במקומות שהטמפרטורות אינן משתנות הרבה בין קיץ וחורף צבע שועל השלג אינו משתנה. למשל, אלו החיים במקומות קרים כל עונות השנה נשארים בדרך כלל לבנים. אלו החיים בחופים המתחממים בקיץ נוטים להישאר כחלחלים.

**מעגל החיים:** השועל הארקטי הוא מונוגמי והזוג נשאר יחד תקופת זמן ארוכה. תקופת החיזור היא מפברואר למרץ. לאחר תקופת הריון של 53 ימים נולדים 5-10 גורים במאורה תת קרקעית. מאורה זאת נרחבת ובעלת פתחי כניסה רבים, היכולה לשמש עבור כמה

דורות. הזכר עוזר בגידול הצעירים. הגורים נשארים במערה עד גיל 3 שבועות. לאחר מכן הם יוצאים ממנה אך אינם מתלווים להוריהם במסעות הצייד לפני גיל 8 שבועות.

**התנהגות:** שועל השלג נע רבות בכל תחום מחייתו. נמצאו פרטים שסומנו במרחק 1500 ק"מ ממקום הסימון. מאמינים ששועלי שלג נישאים גם על גבי גושי קרח צפים. יש להם אופן תנועה עונתי ברור. באביב ובקיץ הם חיים באזורים הצפוניים ביותר של תחומם וחוזרים לפנים היבשת לתקופת החיזור וגידול הצעירים. למשפחה יש נחלה בשטח של 3-7 מילים ריבועיים (8.6-18.5 ק"מ מרובע). הנחלות חופפות רק לעיתים נדירות. גודל הנחלה תלוי ביכולת הצייד.

## **(ב) הצרכים המיוחדים של שועל השלג**

לאור הנתונים הללו ניתן לאפיין את הצרכים הפיסיקליים המיוחדים של שועל השלג על פי עונות השנה ועל פי שני המופעים שלו: "שועל שלג לבן" ו"שועל שלג כחול".

כאמור, מזונו העיקרי של שועל השלג הוא מכרסמים, ובעיקר למינגים החיים במחילות באזורים הארקטיים. כדי להשיג את מזונו העיקרי הזה צריך שועל השלג להיות גם בעל כושר חפירה יעיל בשלג ובאדמה שמתחת לשלג, וגם בעל מהירות ריצה וזריזות בתמרונים כדי לתפוס את המכרסם המנסה לברוח. לכן הדרישה הפיסיקלית המכנית העיקרית שלו היא חפירה באדמה מושלגת, אם כאשר השלג שזה עתה ירד עדיין רך או לאחר שהוא התקשה וכיסה מתחתיו את האדמה בה מתחבאים הלמינגים. לשם חפירה דרושות ציפורניים חדות ברגליים. בנוסף לכך, חפירת מנהרות בשלג, כפי שיודע כל מי ששיחק בשלג בחרמון, כרוכה לעיתים תכופות במפולת השלג על גוף החופר. מפולת כזאת מועכת את גופו ועשויה להזיק לחופר. לכן חשובה גם יכולת אמידה בפני מפולות תכופות. לכן, שני הצרכים המכניים החשובים ביותר אצל שועל השלג הם כושר חפירה יעיל באמצעות הרגליים ומניעת נזקים בגין מעיכות תכופות. שני צרכים אלה הם בדרגת חיוניות גבוהה ובלעדיהם אין לשועל השלג יכולת קיום באזור הארקטי. כאמור, יש התאמה בין מספר הלמינגים למספר שועלי השלג. מכאן שהוא אכן זקוק לצרכים מכניים אלה.

סוג הצרכים הבא בחשיבותו, אחרי המכניים, הם הצרכים החומניים. ראינו לעיל ששועל השלג מצוי במקומות הקרים ביותר, אשר רק דובים לבנים מסוגלים לשרוד בהם. לשרוד בטמפרטורה של מינוס 80 מעלות צלסיוס אינו דבר כה פשוט ומחייב התגוננות נאותה בפני עודף קור. כאמור, שועל השלג צריך להיות זריז. פירושו של דבר שאסור לו לנוע בכבדות כמו הדוב הלבן, החי אף הוא באותם אזורים. אי לכך, לא רצוי ששועל השלג יהיה כבד מידי, ולכן לא רצוי שתהיה לו שכבת שומן עבה מידי. לכן עליו להתגונן בפני הקור העז וסופות הרוח והשלג בעיקר באמצעות פרוותו. מכאן הערך המירבי, שצוין לעיל, של יכולת הבידוד של פרוותו, ביחס לכל היונקים האחרים. כלומר הצורך החומני החשוב ביותר אצל שועל השלג הוא בידוד בפני עודף קור באמצעות הפרווה. אולם בקיץ יש מקומות אשר בהם הטמפרטורה עולה באופן יחסי במידה ניכרת. כגון בחופים מסוימים. בשעות היום של הקיץ הארקטי השמש מגיעה גם אל החי והצומח בקוטב ומחממת את הפרווה העבה. הפרווה הלבנה אומנם מחזירה חלק גדול מהקרינה (אלבדו) אך חלק לא מבוטל עובר גם אל תוך פנים הפרווה ומשם מחמם את העור. אם גם האויר בסביבה חם, כלומר בקרבת החופים הממוזגים יחסית על ידי הים, אין פליטה של החום הנצבר על ידי הפרווה אל האויר והחום מגיע אל העור עצמו. חימום יתר של העור עשוי לחדור אל הגוף ולחמם את שכבת השומן (אפילו אם אינה עבה) שמתחת לעורו של שועל השלג. דבר כזה עלול להמס את שכבת השומן ובכך להקטין את יכולתה של שכבת השומן לשמש כבולם זעזועים, כפי שהשכבת שומן בזאת משמשת אצל יונקים ובעלי חיים אחרים. אי לכך רצוי מאד שבמקומות חמים בקיץ תקטן הפרווה, לשם אוורור טוב יותר, ושהיא עצמה תבודד מחום במהלך היום. יחד עם זאת גם בלילה הקיצי באזור הארקטי, ולא רק שם, הטמפרטורות נמוכות, אם כי לא במידה

של החורף, ונדרשת מידה מסוימת של בידוד בפני קור אפילו בקיץ. לכן התכונות החומניות הנדרשות מהפרווה הן: בחורף - רמה גבוהה של בידוד קור. בקיץ - רמה בינונית של בידוד קור ורמה בינונית של בידוד חום.

יש לשועל השלג צרכים פיסיקליים נוספים כגון אי חדירות של המים והשלג לגופו, ועוד. אך כאן אני מתרכז רק בהסברת התכונות הפיסיקליות המכניות והחומניות. אקווה בעתיד לטפל בתכונות האחרות.

### ג) הסבר פיסיקלי לצבעים של שועל השלג

ראינו בסעיף הקודם שהצרכים הפיסיקליים החשובים ביותר אצל שועל השלג הם: א) כושר חפירה יעיל וזריזות תנועה. ב) עמידות גבוהה בפני סכנות מעיכה תכופות. ג) בחורף - רמת בידוד גבוהה של קור ד) בקיץ - רמת בידוד בינונית של חום ורמת בידוד בינונית של קור.

ראשית נשים לב ששני הזוויגים של שועל השלג, בשני המופעים - לבן וכחול - דומים בצבעיהם, אחרת הדבר היה נאמר במפורש באחד המקורות. הדמיון בין שני הזוויגים קשור לכך שגם הזכר וגם הנקבה מטפלים בגורים, כנראה בתורות, ושניהם יוצאים למסעות ציד, כפי שמוסבר לעיל. בקטע על התנהגות שועל השלג. לכן שניהם עומדים בפני אותם צרכים פיסיקליים, הן המכניים והן החומניים. מכאן הדמיון בצורתם וצבעיהם, על פי עקרונות הגישה החדשה המתוארים בפרק א'.

כפי שרואים בטבלת ההתאמות בין הצבעים והתכונות המכניות והחומניות בפרק ב' (להלן - "טבלת ההתאמות") וכן בפרק ז' הדין בדוגמאות לצבע הלבן, מותאם הצבע הלבן לשתי התכונות הבאות: תכונה מכנית: "אלסטיות לתוספת מעיכה" (10) (המספר כאן מציין דרגה שרירותית לצורך ההמחשה). תכונה חומנית: "בידוד מעודף קור" (10). האלסטיות נדרשת, כפי שהוסבר בהגדרות בפרק ב', כדי לאפשר לגוף לחזור למצבו המקורי עקב הפעלה חוזרת של כוח והסרתו. פעולות המעיכה התכופות על גופו של שועל השלג, בעקבות מפולות השלג בעת חפירת הבורות, דורשות מהפרווה "אלסטיות לתוספת מעיכה". אני רוצה להזכיר כאן שבמאמר הפתיחה שלי בפורום המדע של WALLA הבאתי כדוגמא את העכביש "רצחול מדברי". צבעו צהבהב, דהינו צהוב פלוס לבן. נימקתי שם את הצורך בלבן כדי לעמוד במפולות תכופות של חול מדברי על גופו של העכביש בעת חפירת המחילה בחול. כלומר, התכונה המכנית "אלסטיות לתוספת מעיכה", המותאמת אצלי לצבע לבן, עונה הן על הצרכים במדבר הלוחט מחום והן על הצרכים במדבר המושלג והקפוא מקור באזור הארקטי. שתי התכונות הללו המותאמות ללבן מסבירות היטב את צבעה הלבן של הפרווה העבה בחורף של "שועל השלג הלבן", באותה מידה שהן מסבירות את הפרווה הלבנה של הדוב הלבן. כאמור, שועל השלג הלבן אינו משנה את צבעו הלבן בקיץ אם הוא נשאר באזורים הקרים. זה מרמז לי על כך שהדוב הלבן מצוי בכל עונות השנה במקומות הקרים, ולכן פרוותו נשארת לבנה בעיקרה כל עונות השנה.

### הצבע החום

מה קורה ל"שועל השלג הלבן" בקיץ כאשר הוא מצוי באזור חמים יחסית. כמוסבר לעיל, באותו אזור משתנה צבע פרוותו העיקרי לצבע חום, כאשר החלקים התחתונים בהירים יותר. מהן התכונות הפיסיקליות המותאמות לצבע חום. על פי טבלת ההתאמות צבע חום מתקבל מצירוף הצבעים הבסיסיים כדלקמן: 40% שחור, 30% אדום-שקיעה ו-30% צהוב-שמש. בהתאם לכך, ובהתחשב בתכונות הפיסיקליות המותאמות לכל אחד משלושת צבעי הבסיס הללו נרשום להלן את התכונות הפיסיקליות של הצבע חום הזה:

תכונות מכניות של צבע חום: "קשיחות לתוספת מתיחה" (4) +  
"אלסטיות לתוספת כיפוף" (3) +  
"קשיחות לתוספת גזירה" (3).



## = "אלסטיות לתוספת כיווץ כיפופי" (10)

$$\begin{aligned} & \text{תכונות חומניות של צבע חום: "בידוד מעודף חום" (4) +} \\ & \text{"התפשטות לתוספת חום" (3) +} \\ & \text{"שימור עודף חום" (3).} \\ & = \text{"התכווצות כיפופית בעודף חום" (10).} \end{aligned}$$

הערה: בכל מאמר חדש שלי אני עושה עוד איזה צעד לשיפור התיאוריה. כאן אני עושה צעד קטן נוסף כאשר נוכחתי עתה שניתן לזהות את התכונות המכניות והחומניות המותאמות לצבע החום עם תופעת הכיווץ הכיפופי, כלומר כיווץ בדרך של כיפוף בדומה לאקורדיון, להבדילו מכיווץ בדרך של פיתול אשר עליו אני מדבר בכל הקשור לצבע "כחול-שמיים". כלומר, התכונה המכנית המותאמת לצבע חום היא "אלסטיות לתוספת כיווץ כיפופי" (10), אשר במחשבה מעמיקה ניתן לראות אותה כשילוב של שלושת התכונות המכניות של שלושת צבעי הבסיס שחור, אדום-שקיעה וצהוב-שמש. הנימוק הוא זה: כאשר משטח מתכווץ בדרך של כיפוף, מתווספים לתהליך הכיווץ גם מאמצי מתיחה של החלקים הסמוכים לאזור הכיפוף. כמו כן, מאחר ומדובר במשטחים אורגניים רב שכבתיים, כל מתיחה וכיפוף של משטח כלשהו מביא לחיכוך עם המשטח שמתחתיו. חיכוך כזה פירושו תוספת מאמצי גזירה. כדי להגן על כל אלה דרושות במהלך הכיווץ הכיפופי התכונות "קשיחות לתוספת מתיחה", "קשיחות לתוספת גזירה" וכמובן "אלסטיות לתוספת כיפוף".

התכונה החומנית של הצבע חום היא "התכווצות כיפופית בעודף חום" (10), שהיא שילוב של שלושת התכונות החומניות של שלושת צבעי הבסיס הללו. כאשר משטח מתכווץ עקב עודף חום הוא מקטין את כושר העברת החום פנימה. כדי להבין זאת לעומק נסתכל על שני משטחים העשויים מאותו חומר. האחד שטוח והשני בעל כיפוף אקורדיוני. נשלח אלומת אור חזקה בניצב לשני המשטחים. אצל המשטח השטוח - כל החלקים החשופים לאלומת האור יגיבו באותה צורה. כלומר, או שהם יבלעו בשלמות את אנרגיית האלומה, ואז המשטח יראה שחור. או שהם יחזירו בשלמות את אנרגיית האלומה, ואז המשטח יראה לבן, או שהם יעבירו דרכם את כל אנרגיית האלומה, ואז המשטח יראה שקוף. כמובן שיכולים להיות מצבי ביניים אך לצורך הדיון העקרוני כאן נתעלם מהם. מה יקרה בעקבות אותה אלומת אור אצל המשטח בעל הכיפוף האקורדיוני. מאחר והאלומה אינה פוגעת בניצב, יש לצפות לכל שלושת התופעות באופן חלקי. זאת ללא תלות בכך אם המשטח השטוח היה מחזיר, בולע או מעביר בשלמותה את כל האנרגיה. לכן מה שנראה זה שילוב של שחור פלוס לבן פלוס שקוף. מאחר ושקוף פירושו בעיקר העברת האולטרה סגול (כפי שרואים בטבלת ההתאמות אצלי ובהסברים ל"צבע" "שקוף-אולטרה סגול"). כלומר החלק העליון של הספקטרום, הקרוב לסגול, יעבור ולא יוחזר. לכן מה שיוחזר חלקית הם בעיקר הצבעים צהוב-שמש ואדום-שקיעה. זאת בנוסף לשחור בגין הבליעה החלקית. בכך נקבל את הצבע החום שהוא כאמור אצלי, שילוב של שחור, צהוב-שמש ואדום-שקיעה. בנוסף נקבל חלקית את התכונות החומניות הקשורות עם כל אחד משלושת הצבעים. בידוד החום (המותאם לשחור) יהיה חלקי. שימור עודף החום (המותאם לצהוב-שמש) יהיה חלקי. התפשטות בגין עודף חום (המותאם לאדום-שקיעה) תהיה חלקית.

**הקשר בין שתי התכונות** המותאמות לצבע החום ברור. כאשר יש התכווצות כיפופית בגין עודף חום חשוב שתהיה אלסטיות לתוספת כיווץ כיפופי, שכן כאשר עודף החום יורד - מתרפה הכיווץ הכיפופי של המשטח והדבר מחייב מהמשטח אלסטיות לכיווץ כיפופי. זאת כדי שהמשטח יחזור למצבו המקורי ולא ינזק.

בכך הבהרנו את המשמעות הפיסיקלית של צבעי "שועל השלג הלבן" בקיץ ובחורף. נעבור עתה להבהרת המשמעות הפיסיקלית של צבעי "שועל השלג הכחול".

## הצבע הכחול

ראינו לעיל שהצבע של "שועל השלג הכחול" בחורף הוא כחול-בהיר. כלומר שילוב של כחול-שמייים ולבן. בקיץ הצבע שלו כחול-אפרורי כלומר שילוב של כחול ואפור. נתחיל בדיון לגבי הצבע בחורף. צבע כחול-בהיר מורכב אצלי מ%50 כחול-שמייים ו%50-לבן. כפי שרואים בטבלת ההתאמות, התכונות הפיסיקליות המותאמות לצבע כחול-שמייים הם: תכונה מכנית: "אלסטיות לתוספת פיתול". תכונה חומנית: "התכווצות בעודף קור". כאמור לצבע לבן מותאמות התכונות הבאות: תכונה מכנית: "אלסטיות לתוספת מעיכה". תכונה חומנית: "בידוד מעודף קור". לכן

התכונה המכנית של כחול-בהיר: "אלסטיות לתוספת מעיכה" (5),  
"אלסטיות לתוספת פיתול" (5).

**= אלסטיות לתוספת מעיכה ופיתול"**

התכונה החומנית של כחול-בהיר: "בידוד מעודף קור" (5),  
"התכווצות בעודף קור" (5).

**= "בידוד מעודף קור על ידי התכווצות פיתולית".**

כאמור, "שועל השלג הכחול" נראה יותר בתקופת הקיץ, בעוד ש"שועל השלג הלבן" נראה יותר בחורף. מעובדה זאת ניתן להסיק ש"שועל השלג הכחול" פחות מוגן בחורף מאשר "שועל השלג הלבן". מאידך, אנו נוכחים כאן שכנגד הפחתת הצבע לבן מופיע צבע כחול-שמייים, אך לא שחור. שחור מבודד מפני עודף חום, דבר שאינו נחוץ בחורף. כמו כן שחור מותאם ל"קשיחות לתוספת מתיחה". אולם השלג רך וחלק. לכן אין חיכוך ממשי של פרוות השועל הגורמת למאמצי מתיחה. מכאן שגם תכונה מכנית זאת של שחור אינה נחוצה בחורף הארקטי. מאידך, הרוחות באזורים הארקטיים הללו חזקות ותכופות. בעיקר בחורף. אמנם לא מצאתי הערה ברורה האומרת ש"שועל השלג הכחול" מצוי באזורים בעלי רוחות היוצרות מערבולות ארוכות ומפותלות יותר מאשר "שועל השלג הלבן" אך בעקבות הערתי כאן אני מסיק שתוספת התכונה המכנית "אלסטיות לתוספת פיתול" לפרוותו של "שועל השלג הכחול" מצביעה על כך. אחרי הכל, אם יש שני מופעים שונים של שועל שלג צריכה להיות לכך סיבה פיסיקלית ברורה. הסיבה אותה אני מציע נראית לי סבירה. המערבולת הארוכה המפותלת גורמת וודאי לתחושת קור קשה, אם אין הגנה בפניה. לכן נחוצה התכונה החומנית "בידוד מעודף קור על ידי התכווצות פיתולית".

בכך הבהרנו את התכונות הפיסיקליות של הצבע החורפי של "שועל השלג הכחול" - כחול-בהיר. בקיץ צבעו כאמור כחול-אפרורי. כחול-אפרורי מורכב להערכתי כדלהלן: 40% כחול-שמייים, 30% לבן ו%30-שחור. בהתאם לכך, על פי טבלת ההתאמות:

התכונות המכניות של כחול-אפרורי: "אלסטיות לתוספת פיתול" (4),  
"אלסטיות לתוספת מעיכה" (3),

"קשיחות לתוספת מתיחה" (3).

**= אלסטיות לכיווץ פיתולי.**

התכונות החומניות של כחול-אפרורי: "התכווצות בעודף קור" (4),

"בידוד מעודף קור" (3),

"בידוד מעודף חום" (3).

**= התכווצות פיתולית בעודף קור.**

אנו נוכחים שבקיץ מתווספת התכונה החומנית "בידוד מעודף חום" גם אצל "שועל השלג הכחול" ולא רק אצל "שועל השלג הלבן". יש להניח שהתוספת נובעת מאותה סיבה, כפי שהוסבר לעיל בנוגע לצבע חום. את תוספת התכונה המכנית "קשיחות לתוספת מתיחה"

ניתן להסביר בכך שבקיץ האדמה חשופה יותר בשל הפשרת השלג ולכן הן החפירה באדמה והן המגע עם הסלעים והאדמה גורמים לחיכוך גדול יותר עם הסביבה שכתוצאה ממנה נוצרים מאמצי מתיחה על שערות הפרווה. הקשיחות לתוספת מתיחה דרושה כדי למנוע קריעת שער הפרווה. דבר שיקטין את יעילותה למימוש תפקידיה האחרים.

בכך מצאנו הסברים פיסיקליים גם לצבעי הקיץ של "שועל השלג הכחול".

### **סיכום:**

נוכחנו בפרק זה שניתן להסביר את המשמעות הפיסיקלית של הצבעים בשני המופעים של שועל השלג, במופע הלבן ובמופע הכחול. כאשר בכל אחד מהמופעים יש שינויי צבע בהתאם לעונות השנה: חורף וקיץ. כל ההסברים הפיסיקליים החלו מנקודת המוצא של התפריט ותנאי הסביבה בהם חיים שועלי השלג.

## **פרק יב - החתולה פרייה**

### **הקדמה**

בני הוא סטודנט מוכשר בשנה שלישית במתמטיקה ומחשבים ובעל לב רחום. כאשר הוא רואה גור חתולים שננטש על ידי אמו ומצוי בסכנת קיום הוא אוספו לביתו ומגדל את החתול בהרבה אהבה. כאשר החתול גדול דיו הוא מוסרו למי שחפץ בחתול ולאחר זמן קצר מוצא בני גור חתולים מסכן אחר. לאחרונה נזדמן לי לצפות ולשחק עם החתולה האחרונה שלו בת כשלושה חודשים. קוראים לה פרייה על שם אלה במיתולוגיה הנורדית. להלן אתאר את הצורות וצבעים של החלקים השונים בחתולה פרייה ואציע הסברים פיסיקליים לקיומם של הצורות והצבעים הללו.

### **(א) תאור החתולה**

**מידות:** (לא מדויקות - אלא לשם התרשמות כוללת בלבד): אורך גוף מראש עד בסיס זנב כ-35 ס"מ. אורך זנב כ-20 ס"מ. גובה גב בעמידה כ-20 ס"מ. האפרכסות זקופות בצורת פירמידה משולשת בגובה כ-4 ס"מ.

### **צבעים**

**ראש:** הפנים מוארכות במקצת. פס שחור בכל צד של האף לכל אורך האף עד לעין. קצה האף ורדרד ומסביב פס דק משולש שחור. השפם בעל שערות ארוכות. הן לבנות במרבית החלק החיצוני של השערה. בערך בשליש השערה הקרוב לעור השפה העליונה - הצבע של השערה שחור. נקודה שחורה בחיבור של כל שערה לעור. פס ראשון דק שחור כהה מוביל מזווית העין אל הצוואר, בכל צד של הפנים. פס שני שחור כהה מוביל מבערך אמצע החלק התחתון של העין אל כיוון הצוואר ומתחבר עם הפס הראשון באזור הצוואר.

**לשון:** אדמדמה ובעלת יכולת כיפוף. את זאת ניתן להיווכח כאשר החתולה פרייה מפהקת. מטרת הפיהוק הכנסת אויר בכמות גדולה לריאות. פתיחת הפה ומתיחתו מאפשרים זאת. כנראה שבנוסף לכך גם מתיחת הלשון תוך כדי כיפופה גורם למתיחה של בסיס הלשון, כלומר להגדלת הלוע דרכו חודר האויר.

**עיניים:** האישון בצורת פס אנכי בחשיפתו לאור יום, גם כאשר השמש מצויה בכיוון ההפוך לכיוון מבטה. כאשר השמש מולה, הדבר לא מפריע לה להתבונן לכיוון הכללי של השמש, בעוד לי הדבר מפריע. באותה עת האישון צר מאד עד כדי פס דק מאד. כאשר האישון סגור הקשתית כולה בצבע זית צהבהב-ירוק. בדקתי שהעיגול הצבעוני הגדול הוא אכן הקשתית ולא חלק מלובן העין הלבן המתגלה במקצת כאשר היא מסתכלת הצידה.

נוכחתי שכאשר האישון פתוח למחצה בצורת שקד יש סביב האישון אליפסואיד בצבע מעט יותר ירוק מאשר יתר הקשתית.

קרנית העין בולטת מאד, ביחס לקרנית של אדם, כפי שניתן להיווכח במבט מהצד. יש מרחק ניכר בין הקרנית לקשתית. כידוע החלל הזה, הנקרא "הלשכה הקדמית" ממולא ב"מי הלשכות".

**אוזניים:** האפרכסות בצורת משולש מוארך מקומר. הצבע החיצוני של האפרכסת אפרפר. צבע פנימי לבנבן עם שערות לבנות בקדמת האפרכסת מבפנים. החתולה פרייה יכולה לא רק להניע את האפרכסת לכיוונים שונים אלא אפילו להצר אותה, כלומר שצלעות המשולש יתקרבו זה לזה, תוך כדי קימור נוסך של האפרכסת. הדבר מרמז שיש לחתולה פרייה יכולת שליטה גם על אורכי הגל של הקול הנכנסים לתעלת האוזן. הצרת האפרכסת פירושה העברת צלילים גבוהים יותר, בעלי אורכי גלים קצרים יותר מאשר כאשר האפרכסת במצבה הרגיל. לנו אין אפשרות כזאת.

**הגוף:** הצבע הבסיסי של פרוות החתולה פרייה הוא אפור. הגחון כולו בצבע בסיסי בהיר כולל מתחת לצוואר ובצד התחתון של הזנב. יש בפרווה פסים וכתמים שחורים באזורים שונים כדלהלן: 5 פסים שחורים אורכיים נמשכים מעורפה ועד צווארה. בהמשך גבה קיימים שני פסים אורכיים עבים יותר הנמשכים עד הזנב. בחצי הקדמי של הגוף יש פסי רוחב שחורים שלמים המקיפים את כל הגוף הגלילי, כלומר גם את הגחון. מתחושה אישית אני מקבל את הרושם שחלק מהפסים השחורים עוברים מעל הצלעות הפנימיות בעת שהחתולה מתוחה. אולם זוהי רק התרשמות אישית גסה הדורשת בדיקה מדעית מעמיקה על ידי חוקרי חתולים. בחצי האחורי של גופה משני צדי גבה, קיימים כתמים שחורים המסודרים בצורת מטריצה בהיותה מתוחה. כאשר היא יושבת מתכווץ העור וחלק מהכתמים נראים כמתחברים ליצירת פסים רוחביים שחורים. פסים שחורים יש גם בגחון מתחת לחלק האחורי של הגוף. הפסים הרוחביים על הגב דקים ביחס למרווחים בין הפסים. ברגליים הקדמיות יש פסי רוחב שחורים לכל אורך הרגל כמעט עד לכפות הרגל. ברגליים האחוריות יש פסים שחורים רק עד הברכיים. מהברכיים ומטה הפרווה יותר בהירה מאשר הגוון האפור הכללי של הפרווה. הצד הפנימי של כל הרגליים בהיר אם כי פסי הרחוב השחורים ממשכי גם שם.

**הזנב.** גם בפרוות הזנב יש פסי רוחב שחורים, בעיקר בחלק המרוחק מבסיס הזנב. הצד התחתון של הזנב בהיר אם כי יש גם מעט פסים כהים. קצה הזנב, באורך 5 ס"מ, שחור כולו.

**כפות הרגליים.** שחורות כהות. הגב של כפות הרגליים בהיר. מתחת לכל אצבע יש כרית נוקשה בצבע אפור כהה מט. משם נשלפת הציפורן. הציפורניים קרניות מעוקלות בצבע עכור-מט.

## ב) הסברים פיסיקליים

נתחיל מהצבע האפור הבסיסי של הפרווה. אפור הוא שילוב של שחור ולבן חצי-חצי. להלן חלק מטבלת ההתאמות בין הצבעים הרלוונטיים להסברים שלנו לבין התכונות המכניות והחומניות.

צבעים	תוספת תכונות מכניות	תוספת תכונות חומניות
שחור	קשיחות לתוספת מתיחה (10)	בידוד מעודף חום (10)
לבן	אלסטיות לתוספת מעיכה (10)	בידוד מעודף קור (10)

התפשטות בעודף חום (10)	אלסטיות לתוספת כיפוף (10)	אדום
בידוד מעודף חום (5), בידוד מעודף קור (5).	קשיחות לתוספת מתיחה (5), אלסטיות לתוספת מעיכה (5).	אפור (שחור + לבן)
התפשטות בעודף חום (5), בידוד מעודף קור (5).	אלסטיות לתוספת כיפוף (5), אלסטיות לתוספת מעיכה (5).	אדמדם (אדום+לבן)

כזכור, המספרים בסוגריים אינם מדעיים אלא באים לתת מושג לגבי השקלול בערוב התכונות על פי השקלול בערוב הצבעים. מטבלה זאת נוכחים שהצבע האפור מרמז על התכונות המכניות: "קשיחות לתוספת מתיחה" (5) + "אלסטיות לתוספת מעיכה" (5). התכונה הראשונה מרמזת שבעת הזינוק על הטרף - החלק העליון של עור החתולה נמתח יותר, כנגד הצלעות הפנימיות והגב הקשיח שלה. לכן דרושה "קשיחות לתוספת מתיחה". התכונה השניה מוסברת בכך שכשאר החתולה נשכבת על גבה או על צידה - הפרווה נמעכת במקצת. כאשר היא קמה רצוי שהפרווה תשוב למצבה המקורי כדי לא לאבד מעילותה לגבי יתר התכונות הפיסיקליות הנדרשות ממנה. לכן דרושה מהפרווה "אלסטיות לתוספת מעיכה". הצד התחתון של כל האברים בצבע בהיר, כלומר יותר לבן מאפור. זה מוסבר בכך שהחתולה מועכת חלקים אלה ביתר תכיפות ודרושה שם יותר "אלסטיות לתוספת מעיכה" מאשר בחלק העליון של הגוף. עד כאן לגבי התכונות המכניות של הצבע אפור.

מה באשר לתכונות החומניות "בידוד מעודף חום" (5) + "בידוד מעודף קור" (5). שתי התכונות נחוצות. "בידוד מעודף קור" נחוץ בלילה עבור כל הגוף. "בידוד מעודף חום" נחוץ ביום באזורים הגלויים לשמש ומתחממים בה. מכאן השילוב הנותן תכונות המותאמות לצבע אפור לגבי הגב. בגחון ובחלקים התחתונים של יתר חלקי הגוף הבאים במגע עם הקרקע הקרה, בלילה וביום, דרושה שעיקר התכונה "בידוד מעודף קור" המותאמת לצבע לבן. זה מסביר את הצבע הבהיר בחלקים התחתונים של החתולה פרייה.

התופעה הבולטת ביותר אצל החתולה פרייה היא קיומם של **הפסים והכתמים השחורים** על כל גופה. ניתן להיווכח שבכל מקום בו יש פס או כתם שחור יש סבירות להיווצרות מתיחה של העור כאשר החתולה מותחת את שריריה. סביר שאלו גם אזורי המתיחה כאשר היא מזנקת על הטרף. למעשה אנו נוכחים בהתבלטות הצבע השחור כאשר העור של החתולה אינו מתוח. למשל כאשר היא יושבת או שוכבת בצורה מכווצת. כאמור, צבע שחור מותאם לתכונה המכנית "קשיחות לתוספת מתיחה". כאן, אצל החתולה פרייה ניתן להיווכח בדוגמא נוספת לתכונה זאת. הפסים הרחוביים השחורים, בחלקים הגליליים של הגוף, מרמזים הן על מתיחה אורכית של העור בכיוון ציר האורך של הגליל והן על מתיחת העור בכיוון הרחובי כאשר העור נמתח עקב התנפחות השרירים. כאמור, לא מן הנמנע שמתחת לפסים השחורים עוברות צלעות הגוף של החתולה. סביר שבעת המתיחה של העור יש תוספת מאמץ מתיחה של העור על גבי אותן צלעות. כך גם לגבי פסי האורך על הראש והגב של החתולה. פסי האורך על הגב מרמזים על תוספת קשיחות בעת המתיחה של העור, כאשר חוט השדרה מתחתיו משמש משען קשיח הגורם לעור להמתח. חמשת פסי האורך על הקרקפת והצוואר העליון מרמזים על תוספת קשיחות של העור באזורים אלה בעת מתיחת עור הגוף על גבי עצמות הגולגולת וחוליות הצוואר הקשיחות. כאמור, במחצית האחורית של הגוף אין פסים שחורים שלמים אלא כתמים שחורים אשר רק בעת כיווץ הפרווה נראים בחלקם פסים רצופים, כתוצאה מהתקרבות הכתמים. קיומם של הכתמים במקום הפסים השלמים מרמז על צורך חלקי בהגנה בפני מתיחה. כנראה שבעת הזינוק נמתח בעיקר החצי הקדמי של הגוף, כפי שמעידים גם פסי הרחוב הכהים לאורך כל הרגליים הקדמיות. ממשחקי עם פרייה נוכחתי שהיא נוהגת לזנק ולהיתלות על בדיים, וכנראה בטבע גם על ענפי עצים ומכשולים אחרים, באמצעות הציפורניים ברגליים הקדמיות. ניתן לראות למשל כיצד חתולים מדלגים אל חומה בגובה מטר וחצי. הם מבצעים פעולה קפיצית בעזרת הרגליים האחוריות ונתלים על החומה

באמצעות הרגליים הקדמיות, ובעיקר באמצעות הציפורניים של הרגליים הקדמיות. ברגע שהם נתלו על החומה הם מכנסים את החלק האחורי של הגוף ומתיישבים על החומה. בכך ניתן להסביר את מאמצי המתיחה הגדולים בחלק הקדמי של הגוף לעומת מאמצי מתיחה בינוניים בחלק האחורי של הגוף. יושם לב שבאזור הבטן יש פסים שחורים ולא כתמים שחורים מבודדים. הבטן מתרחבת בעת האכילה. כמו כן אם הבטן אינה ריקה לחלוטין ומזדמן עוד טרף, החתול יזנק עליו בהיות בטנו מלאה. לכן הבטן תמתח, בדומה לכך שכאשר שמים בתוך בלון כדור ומאיצים את קצה הבלון כלפי מעלה, הבלון יתנפח עקב קיומו של הכדור בתוכו.

**שני הפסים השחורים בצדי הפנים** (שתוארו לעיל): הם נועדו להגן על אזורים קריטיים בעור הפנים בפני מתיחת יתר עקב משיכה לאחור של העור יחד עם מתיחת עור הגוף. ניתן לראות זאת בבירור כאשר מרימים את החתולה בעור צווארה, כפי שהחתולות האמהות נושאות את גוריהן. בעת מתיחה כזאת נוכחים כיצד שני הפסים השחורים בצדי הפנים נמתחים. אם לא תהיה קשיחות לתוספת מתיחה באזורים אלה עשויה הרמה כזאת בעור הצוואר להביא לקריעת העור באזור זווית העין ובאזור תחתית העין. שתי נקודות אלו הן קריטיות, כנראה, לתפקוד העיניים. בנוסף לכך, יתכן שהפס התחתון נועד גם להגנה בפני מתיחת יתר של אזור הפס בעת פתיחה גדולה של הפה, למשל כאשר החתולה מפהקת, או כאשר היא מכניסה לפיה טרף גדול.

**כפות הרגליים** שחורות במיוחד אצל החתולה פרייה. הדבר מרמז על התכונה המכנית הנ"ל "קשיחות לתוספת מתיחה". תכונה זאת עשויה להיות נחוצה בעת שהחתולה מזנקת על טרפה. התנועה הקפיצית של שרירי הרגליים ברגע התחלת הזינוק והצורך בתמיכה נגדית של הקרקע גורמים כנראה למתיחה חזקה של עור כפות הרגליים. הצבע השחור בא למנוע קריעה עקב עודף מתיחה. שימוש משני בכפות הרגלים הקשיחות לתוספת מתיחה עושה החתולה כאשר היא חופרת בור באדמה למטרת עשיית הצרכים ולאחר מכן מכסה את הבור. כמו כן עוזר הצבע השחור כהה בכפות הרגליים של החתולה לבודד אותן מעודף חום כאשר היא הולכת על אדמה חמה ביום. ידוע גם שחתולים הולכים ללא רתיעה גם על גגות העשויים מפחים חמים בקיץ. לא לשווא יש הצגה בשם "חתולה על גג פח לוהט".

## **הזנב**

הזנב משמש אצל החתולה פרייה, כמו אצל בעלי חיים רבים אחרים, לצורך איזון הגוף בעת זינוקים על הטרף. קצה הזנב (השחור), באורך כ-5 ס"מ, בעל יכולת תמרון עצמאי. כלומר הוא יכול להתכופף במקצת לצדדים גם כאשר יתר הזנב ישר. הדבר מקנה לזנב יעילות בתמרון שכן ככל ששינוי הצורה רחוק יותר ממרכז הגוף כן השפעתו על מידת הסיבוביות של הגוף גדולה יותר. כזכור מפיסיקה - מומנט הסיבוב שווה למרחק כפול המסה כפול זווית הסטייה מהכיוון הרדיאלי. הצבע השחור של הקצה מצביע על כך שחלק זה מצוי במאמצי מתיחה גדולים יחסית לכל הזנב. יתכן שזה קשור לתמרונים של קצה הזנב. אך האפשרות היותר גלויה היא שזה קשור למגע של הזנב עם הצמחיה בסביבה בה רגיל החתול לנוע. למשל, היתפסות של קצה הזנב בקוץ מחייבת משיכה חזקה. דבר המותח את הפרווה באותו קצה זנב.

התכונה החומנית: כאמור, הצבע השחור מותאם גם לתכונה החומנית "בידוד מעודף חום". יתכן וניתן להסביר תכונה זאת, אצל הפסים והכתמים השחורים, בכך שנוצרים שם עודפי חום בעת פעולת המתיחה. לא רצוי שעודפי חום מקומיים יחדרו את העור ויגיעו לשכבת השומן שתחתיו. החום עלול להמס את השומן ובכך תפחת יעילות השומן להגן על העצמות הפנימיות בפני מכות.

**אוזניים:** כאמור האפרכסות של החתולה פרייה הן בצבע אפרפר בצד החיצוני, ולבנבן בצד הפנימי. את הצבע האפרפר ניתן להסביר באותם נימוקים שהסברנו את הצבע האפור בפרוות החתולה. אם כי כאן יש מעט יותר לבן מאשר בפרווה. להערכת הגסה, אם בפרווה האפורה יש 50% שחור ו-50% לבן אזי בצד החיצוני של האפרכסת יש בסביבות 40%

שחור ו-60% לבן. מה שמעניין יותר הוא הצבע הפנימי של האפרכסת. שם הצבע לבנבן. הייתי מגדיר את הערוב 20% שחור ו-80% לבן. מדוע יש בצד הפנימי יותר לבן. כדי לענות על כך נחזור לטבלת ההתאמה של הצבעים לתכונות הפיסיקליות וננסה להרכיב את התכונות הפיסיקליות על פי אותו שקלול של הצבעים. לכן:

לבנבן (20% שחור + 80% לבן):

תכונות מכניות: "קשיחות לתוספת מתיחה" (2) + "אלסטיות לתוספת מעיכה" (8).  
תכונות חומניות: "בידוד מעודף חום" (2) + "בידוד מעודף קור" (8).

אנו רואים ששתי התכונות הדומיננטיות הן "אלסטיות לתוספת מעיכה" ו"בידוד מעודף קור". מה עשוי לגרום למעיכה בתוך האפרכסת. אני סבור שהתשובה היא: רוח אלכסונית צדדית. מה שמחזק אותי בסברתי זאת הן השערות הלבנות בקדמת האפרכסת מצדן הפנימי. מה ענינה של הרוח לאפרכסת. ובכן, כאשר יש רוח אלכסונית צדדית היא נכנסת לאפרכסת הקעורה ומסתובבת בתוכה. כך נוצרת מערבולת באפרכסת העשויה לטשטש את גלי הקול אותם מעונינת החתולה לשמוע, לצורך הצלחת הטרף. למשל, קולות של תנועת עכברים בין שיחי היער או צפצוף גוזלים על ענפי העצים. כדי שקולות הללו לא יטושטשו חשוב לנסות למנוע את כניסת הרוח לאפרכסת. לשם כך נועדו השערות בקדמת האפרכסת. אולם אם הרוח חזקה היא לא תיבלם על ידי השערות ותמשיך פנימה לאפרכסת. כאן מגיע תורו של החלק הלבנבן הפנימי באפרכסת. המערבולת מועכת במקצת את הצד הפנימי של האפרכסת ומתפרקת, כמו שראינו במקרה של פרווה לבנה בדוב הקוטב. כאשר ברוח פוסקת חשוב שהאפרכסת תשוב למצבה המקורי כדי לרכז היטב את גלי הקול בטונים הרצויים אל תעלת האוזן החיצונית. מכאן הצורך בתכונה "אלסטיות לתוספת מעיכה". בנוסף לכך, המערבולת יוצרת קור בצד הפנימי של האפרכסת. כדי למנוע חדירת הקור לתוך הרקמה הפנימית של האפרכסת, דבר העלול כנראה לי לפגוע בתפקוד האפרכסת, יש צורך בתכונה "בידוד מעודף קור". אלו הן שתי התכונות של לבן. התוספת של 20% שחור בחלק הפנימי של האפרכסת ונתנת הגנה קלה בפני מתיחה ובפני חום.

**לשון:** כאמור הלשון אדמדמה ובעלת יכולת כיפוף. על פי הטבלה לצבע אדמדם התכונות המכניות הבאות: "אלסטיות לתוספת כיפוף" (5) + "אלסטיות לתוספת מעיכה" (5). התכונה הראשונה ברורה מעצם היות הלשון בעלת כושר כיפוף. התכונה השניה דרושה כאשר המזון נכנס לפה והלשון נמעכת במקצת. לאחר בליעת המזון הלשון חוזרת למצבה המקורי, ומכאן הצורך ב"אלסטיות לתוספת מעיכה".

התכונות החומניות של אדמדם הם: "התפשטות בעודף חום" (5) + "בידוד מעודף קור" (5). התכונה הראשונה מרמזת שכאשר מזון חם מדי נכנס לפה הלשון מתרחבת. התרחבות זאת מגדילה את שטח הפנים של הלשון, דבר המאפשר קרור מהיר יותר שלה על ידי פליטת חום ממשטחי הלשון. התכונה השניה "בידוד מעודף קור" מרמזת שאם המשטח החיצוני של הלשון נוגעת בדבר קר מדי, הקור אינו חודר פנימה אל הרקמות הפנימיות של הלשון המלאות בנימי דם ועצבים הקשורים לקולטני הטעם. קרור יתר של הנימים והעצבים עשוי להביא להתכווצותם ולהקטנת זרימת הדם והחומרים העצביים הנחוצים לתפקוד הלשון ובעיקר לצורך הבחנה בטעמים והעברתם למוח.

תכונות פיסיקליות אלו מסבירות מדוע למרבית היונקים יש לשון אדמדמה במידה זאת או אחרת. יוצאי דופן הם בעלי החיים המשתמשים בלשונם לא רק לשם העברת המזון מקדמת הפה אל כיוון הלוע, אלא בעיקר ככלי למשיכת המזון מהסביבה. למשל גמלים וג'ירפות המושכים עלים מהעצים בעזרת לשונם. אצלם הלשון נמתחת ויש צורך בהגנה בפני תוספת מתיחה, ומכאן תוספת הצבע השחור בלשונם.

**לסיכום:**

הסברתי כאן את הצבעים העיקריים של החתולה פרייה, דהינו אלו הקשורים לצבעים שחור, לבן ואדום, ולשילובים שלהם. נוכחנו שבכל מקום שיש שחור ניתן להצדיק את ההתאמה שביצעתי לגבי התכונות הפיסיקליות: "קשיחות לתוספת מתיחה" ו"בידוד עודף חום". בכל מקום שיש לבן ניתן להצדיק את ההתאמה שביצעתי לגבי "אלסטיות לתוספת מעיכה" ו"בידוד עודף קור". בכל מקום שיש אדום ניתן להצדיק את ההתאמה שביצעתי "אלסטיות לתוספת כיפוף" ו"התפשטות בעודף חום". את הדיון בצבעי העין אני משאיר לפרק מורחב המוקדש לצבעי הקשתית בבעלי חיים. בקשר למשמעות צבעי הציפורניים ראה בפרק 'הדן באינפרא-אדום עכור-מט'. אני מניח שהסברים דומים לאלו שניתנו בפרק זה, יהיו טובים גם לחתולים אחרים שיש בהם צבעים שחור ו/או לבן. על צבע פרווה צהוב בעיקרו ראה הסבר פיסיקלי בפרק הקודם, 'יא' הדן בין היתר בחתולים הגדולים בעלי צבע פרווה צהוב בעיקרו.

## פרק יג' - חיות בספארי

בתאריך 11.12.2002 נתתי הרצאה בספארי ברמת גן בנושא "המשמעות הפיסיקלית של הצבעים בבעלי חיים בספארי". בהרצאה נוכחו מנהל הספארי, הביולוגית של הספארי, אנשי החינוך וההדרכה ואנשים המטפלים בחיות. ההרצאה ניתנה בחדר ההרצאות בספארי המכיל בין היתר פוחלצים נהדרים של מספר בעלי חיים וביניהם, דוב סורי, צ'יטה, פילון, חסידה, ציפורים מיוחדות ועוד. על הרצפה היו מונחים עורות של זברה ובעל חיים אחרים, עליהם ישבו חלק מהאנשים. לאחר שהצגתי את עקרונות התאוריה, כפי שמובאים במאמר שלי בפורום המדע של WALLA מתאריך 22.11.02, והצגתי טבלת התאמות מקוצרת בין הצבעים הבסיסיים לתכונות הפיסיקליות, נתתי מספר דוגמאות יפות וענייניות על השאלות המעניינות הרבות שהעלו עובדי הספארי המכירים את בעלי החיים טוב יותר ממני. לשמחתי, יכולתי לתת תשובות במקום לכל השאלות באמצעות הטבלה המקוצרת. להלן כמה דוגמאות ותשובות לשאלות. כאן אוסיף מספר הערות חשובות אשר מפאת קוצר הזמן לא ניתן היה לפרטן בהרצאה.

### **פסי הזברה**

אחת המדריכות שישבה על עור הזברה שאלה כיצד אני מסביר את הפסים של הזברה. להלן התשובה: יש כיום הרבה הסברים לפסי הזברה. אך כולם נחשבים על ידי כמטרות "חברתיות" משניות. לעומת זאת אני, כאמור במאמר הנ"ל, מחפש הסברים פיסיקליים להם אני מייחס חשיבות ראשונית. באחד הספרים הישנים מצאתי לא פחות מתשעה הסברים "חברתיים". למשל, הסוואה, אזהרה, תקשורת, ועוד. מחבר הספר מנתח את כל תשעת ההסברים ומוצא שאף אחד מהם אינו נותן הסבר מלא. לכל הסבר יש יתרונות וחסרונות. מאז קמו וודאי עוד הסברים, אך עדיין השאלה נשארה פתוחה. אני מקווה שההסבר הפיסיקלי שאני מעלה כאן יפתור סוף סוף את החידה הזאת.

### **(א) תפריט צרכים ראשוניים**

**הזברה (Zebra)**, ממשפחת הסוסים, שסימנם המיוחד - רצועות רחב מתחלפות של פסים בעור. יש זברות עם רצועות שחורות ולבנות ויש זברות עם רצועות חומות-כהות המתחלפות עם צהבהבות. הזברות מצויות בטבע באפריקה המזרחית ובדרום אפריקה. יש זנים של זברות שאזור מחייתם הם הסוואנות היבשות במזרח אפריקה: אתיופיה, סומאלי, קניה ועוד. האקלים שם חם בכל עונות השנה, כפי שנוכחים מהאטלסים. זברת ההרים (*Equus zebra*) חיה ברמות של אפריקה הדרומית. גם שם יש סוואנות יבשות. האקלים חם בקיץ אך נוח יותר בחורף (יולי בדרום). הזברות הן סוסי-בר, הדומים לחמורים ברעמתם הקצרה והזקופה, באוזניהם הגדולות ובראשם הגדול. הן חיות בעדרים בני כמה עשרות פריטים. ניזונות מעשב ונודדות בשטחים פתוחים. מגיעות למקורות מים פעם או פעמיים ביום. בהיותן רועות בסוואנה מרעידות הזברות את עורן בתדירות גבוהה, יחסית, כדי להרחיק את החרקים הטורדנים. הן ניצודו בהמוניהן בשל עורן היפה והחזק המשמש בתעשיית העורות.

### **(ב) הסבר פיסיקלי לפסי הזברה.**



שתי הבעיות הגדולות של עור הזברה הן תנאי אקלים וחרקים עוקצניים. במקומות מחייתן של הזברות חם ביום וקר בלילה. הזברה נמצאת במשך היום והלילה בסוואנה (האריות הן האויבות העיקריות של הזברות. אריות צדים בעיקר בלילה. לכן הזברות מצויות בקבוצות כך שתמיד יש מי שמצוי על המשמר בפני טורפים). על פי הטבלה, כדי להתגונן מחום היום דרוש צבע שחור בעל התכונה החומנית " בידוד מעודף חום". כדי להתגונן מקור הלילה דרוש צבע לבן בעל התכונה החומנית "בידוד מעודף קור". בעלי חיים אחרים באותן סוואנות אפריקאיות, כגון פילים (??), הם בעלי צבע פרווה אפור, שהוא שילוב של שחור ולבן. כך היה ניתן לצפות גם אצל הזברה, כפי שצבעם של חמורים רבים. אולם, הבעיה הנוספת של הזברה הם החרקים. בסוואנה, ובעיקר באזורים הסמוכים למקורות מים, יש חרקים רבים המציקים מאד לזברה בעת שהיא רועה בעשב. בעלי חיים אחרים מנפנים בזנב (סוסים) הוא מתפלשים באדמה (חתולים גדולים וקטנים) או בבוץ (היפופוטמים) או מעיפים בוץ על גבם (פילים). כל זאת כדי להתגבר על בעיית החרקים הטורדנים. אולם, כל הפעולות הללו דורשות הפסקות בפעולת האכילה. לבעל החיים הרועה בעשב חשוב כנראה שתהיה לו אפשרות לאכול זמן רב ככל הניתן מבלי לבצע הפסקות תקופות. מה גם שגם אם הוא היה נשכב על הקרקע ונפטר מהחרקים, הרי שמייד עם קומו להמשך האכילה יצוצו חרקים מציקים חדשים. הפתרון שמצאה הזברה, במהלך האבולוציה, הוא הרעת עור הגוף לעיתים מזומנות. כל זאת תוך כדי האכילה. השיטה הטובה ביותר להרעת עור הפרוש על גוף גלילי היא בכיוון ציר האורך של הגליל. במהלך ההרעה רצועות רוחביות בעור מתכווצות, והרצועות שלצידן נמתחות. כדי שהרצועה הנמתחת לא תקרע דרושה תכונה מכנית "קשיחות לתוספת מתיחה". זאת התכונה המכנית שאני מייחס בטבלה לצבע שחור. זה מסביר את קיומן של הרצועות השחורות. לגבי רצועות הרחב המתכווצות הן למעשה עוברות תהליך של מעיכה. כלומר הן נמעות. אולם מיד לאחר הפסקת הרעד חשוב שרצועות אלו תשובנה למצבן המקורי. כלומר חשוב אצלן התכונה המכנית " אלסטיות לתוספת מעיכה". תכונה זאת מיוחסת בטבלה לצבע לבן. כלומר הרצועות הלבנות אלסטיות לתוספת מעיכה והרצועות השחורות קשיחות לתוספת מתיחה. זה מסביר את פסי הרחב השחורים לבנים לסירוגין אצל הזברה. השוויון בין רחב הפסים הסמוכים מאפשר גם את ההגנה החומנית הנ"ל באופן שווה בפני עודף חום ובפני עודף קור. כלומר, במקום צבע אפור באזור רחבי מסוים בעור הגלילי יש שני פסים שחור-לבן ברוחב דומה.

עתה, לאחר שאנו מבינים את העיקרון המכני שעומד מאחורי הפסים, דהינו - כדי לאפשר הרעה יעילה של העור, אנו יכולים להסיק על פי שרטוט הפסים אלו חלקים של העור מורעדים יחדיו. ניקח לדוגמא את התמונה המופיעה באנציקלופדיה העברית, ערך "זברות" כרך טז עמ' 600. בתמונה זוג זברות מזן (*Equus burchelli [granti]*). רואים בברור שהפסים במחצית האחורית של הגוף משרוטטים כך שכל הרעה של העור בחלק זה תרעיד גם את העור ברגליים. רואים כיצד הקשתות הלבנות מתכנסות לכיוון החיבור עם הרגליים האחוריות. שם פסי הרחב אופקיים. על פי השרטוט של מחצית הגוף הקדמית, כולל הצוואר והראש, מתקבל אצלי הרושם ששלושתם מורעדים יחד. נשים לב שבחיבור אל הרגליים הקדמיות יש פסים משולשים המאפשרים לעור הרגל לקבל הרעה על ידי המתיחות וההרפיות של העור של הגוף והצוואר באותו אזור של החיבור. השרטוטים מרמזים גם שהרעת הצוואר גוררת גם את הרעת העור בראש. אם הייתי צריך לתכנן מראש שיטת הרעה יעילה של חלקי הגוף השונים בעור מורכב על גוף כתבנית הזברה, לא הייתי מצליח להגיע לשלמות הזאת שמצא הטבע. מהתמונה של הזברה ההררית הנ"ל בעמ' 374 בכרך ה' של האנצ' העברית, ערך "אפריקה הדרומית, ברית", רואים שגם אצלה מתקיימים כללי השרטוט הללו, אם כי הרגליים לבנות - דבר המצביע על כך שלגבי הרגליים בעיית הקור חמורה יותר מבעיית החרקים.

עד כאן ההסבר הפיסיקלי לגבי הזברות עם פסים שחורים המתחלפים לסירוגין בפסים לבנים. כאמור, קיימות זברות עם רצועות חומות-כהות המתחלפות עם רצועות צהבהבות. שני הצבעים הללו מצביעים על תוספת צבע צהוב לפרוות הזברה. כלומר לפסים השחורים התווסף צהוב ונתקבל חום-כהה. לפסים הלבנים התווסף צהוב ונתקבל צהבהב. כלומר הזברות הללו צהובות יותר מאשר הזברות שחור-לבן. על פי הטבלה לצבע צהוב יש התכונות "קשיחות לתוספת גזירה" ו"שימור עודף חום". הדבר מרמז לי על תוספת דינמיות אצל הזברות הצהובות יותר ביחס לזברות שחור-לבן. אין בידי בשלב זה מידע לגבי הצרכים הנוספים המיוחדים של הזברות הצהובות יותר ביחס לצרכים של הזברות שחור-לבן - צרכים הדורשים תוספת דינמיות. אך די למשל אם הזברות הצהובות יותר

רעות במקומות מיוערים ולא בסוואנות פתוחות - כך שמידי פעם יהיה עליהן לעבור מעל מכשולי ענפים במטרה להגיע לעשב הרצוי - , וכבר יש לנו הסבר לגבי תוספת הדינמיות. מובן שתתכן אפשרות אחרת, אך הבאתי אפשרות זאת כדי להצביע על קו המחשבה להסברת הצבעים המתחלפים אצל הזברות הצהובות יותר.

## **פילים**

הפילים ניחנים בשתי תכונות פיסיקליות בולטות: (א) כובד ויציבות בעמידה ובהליכה איטית. (ב) חוסר שימוש בגפיים להשגת המזון. במקום גפיים הם משתמשים בחדק הארוך. מזונם המיוחד מכתוב תכונות אלו. בהתאם לכך גם צורתם וצבע גופם.

### **(א) תפריט צרכים ראשוניים**

חיים ביערות ושטחים פתוחים בדרך כלל ליד מקווי מים.  
**פיל אפריקאי (גדול):** זן חום - שוכן יערות ואוכל עלים, נצרים, פירות, עשבים וגם פקעות ובצלים, אשר אותם הוא מגלה בעזרת שנהביו.  
**פיל אפריקאי זן אפור:** מצוי בשטחים פתוחים.  
**פיל הודי (קטן):** אפור: אוכל בעיקר עשב בשטחים פתוחים בהודו.  
תפקיד האפרכסות בפילים: ריכוז קולות בעלי טונים נמוכים מאד. לכן יש צורך באפרכסות גדולות. מניע את האפרכסות תוך כדי שיחה (בטונים נמוכים מיכולת שמיעה של אדם) עם הפילים האחרים. תנועת האפרכסות חוסכת הטרחה להזיז את כל הראש המגושם.

## **ג'ירפה**

חיה באזורים ערבתיים באפריקה מדרום לסהרה. ניזונה מענפים ועלים בעיקר של עצי שיטה שבאפריקה. צועדת על ידי קידום צד אחד של הרגליים בכל פעם.  
יציבות לגובה, צבע פרווה בסיסי חום- צהוב (לצורך גמישות בין חלקי העור כמו אצל החתולים הגדולים). רשת אלכסונים בהירה יותר (תוספת לבן) לצורך "אלסטיות לתוספת מעיכה" בגוף הצינורי. צבע הרגליים מתחת לברכיים בהירות, בעיקר לצורך בידוד מעודף קור. הגוון והרישות בגוף בהתאם לאזורי מחיה בטבע. בספארי יש "ג'ירפה מסאית" ו"ג'ירפה מרושתת".  
לשון - כחלחלה (כחול+לבן+שחור):  
כחול: "אלסטיות לתוספת פיתול" הנחוצה בעת ליפוף עלים.  
לבן: "אלסטיות לתוספת מעיכה" של העלים בלשון.  
שחור: "קשיחות לתוספת מתיחה" של הלשון בעת משיכת עלים.

### **משפחת החתולים הגדולים (נמרים, טיגריסים, אריות ועוד):**

צבע פרווה בסיסי צהוב - לצורך גמישות העור תוך כדי מהירות ותמרונים.  
כתמים או פסים שחורים - "קשיחות לתוספת מתיחה" מקומית התלויה באופי התנועה.  
גחון - לבן ("אלסטיות לתוספת מעיכה" ברביצה, בידוד עודף קור").  
הנמר השחור חי באזורים יותר חשופים לשמש. לעומתו, לנמר השלג החי בצפון פרווה בהירה יותר מהרגיל.

## **קופים**

צבע פרווה: מכיל בעיקר שחור הנותן "בידוד עודף חום" ביער החם, קשיחות לתוספת מתיחה" הנוצרת בחיכוך עם ענפי העצים.  
אחוריים: צבע אדמדם (אדום + לבן):  
אדום: "אלסטיות לתוספת כיפוף" בשל הנפיחות, "התפשטות בחום".  
לבן: "אלסטיות לתוספת מעיכה" בשל הישיבה, "בידוד עודף קור".

## **דב**

צבע הפרווה: צבע אחיד, בהתאם למידות הקור (לבן) או מידות החום (שחור) להם הם נחשפים בטבע.

## **צבי**

**חי** בסוואנות צמחיות או במישורים מדבריים פתוחים. ניזון מעשבים ומעלים של עצים, כמו עצי שיטה בנגב. הצבי מהיר וקל תנועה. מדלג מעל משוכות גבוהות. מתרומם אל הענפים בעזרת שתי רגליו הקדמיות.

**צבע גוף עיקרי:** למעלה חום בהיר. הגחון לבן. פס שחור מפריד בין הצבע הלבן והחום ומחבר בין הרגליים הקדמיות והאחוריות.

**הסבר פיסיקלי לפס השחור:** בזמן דילוגים גבוהים או הרמת הרגליים על העצים, נמתח העור באזורים שבין הרגליים הקדמיות והאחוריות. למניעת קריעת העור באותם אזורים דרושה התכונה "קשיחות לתוספת מתיחה", המותאמת אצלי לצבע שחור.

**קרניים:** לדעתי, מטרת הקרניים אצל הזכר של הצבי, היעל, האימפלה, הראם, קובוס המים, הדישון, הניאלה, ועוד בעלי חיים רבים, היא לצורך שמירת האיזון של הראש. אצל מרבית החיות, הזכר הוא זה שעומד על המשמר וצופה כאשר ראשו אופקי. המשיכה אחורה על ידי הקרניים מקלה את העומס של הראש כלפי מטה - דבר המקשה על הצוואר לאורך זמן. (לא אחת שמעתי על זכר אשר מת בעקבות כריתת קרניו. להערכתו הדבר נובע מכך שהוא לא יכול היה לשאת לאורך זמן את ראשו במצב מאוזן).

## **סיכום**

ראינו בדוגמאות הרבות בפרקים ג' עד יג' שניתן למצוא הסברים פיסיקליים אצל בעלי החיים לשבעת צבעי הבסיס: כחול-שמיים, צהוב-שמש, אדום-שקיעה, לבן-ענני קיץ, שחור-לילה, אולטרה סגול - שקוף מבריק, ואינפרא אדום -עכורי מט. באותו אופן ניתן להסביר גם את הצבעים המשולבים מצבעי היסוד הללו, כגון ירוק, כתום, סגול, אדום-עז, חום ועוד. בטבלת ההתאמות בפרק ב' ניתנים שילובי צבעים מסוימים בשקלולים מוגדרים והותאמו להם התכונות הפיסיקליות (המכניות והחומניות) המתאימות בהתאם לאותם שקלולים. כל זאת כמובן לשם הדגמה של הגישה החדשה. אני מתכנן להכין פרקים מקבילים גם לגבי הצבעים בצומח ובדומם.

כדי לאשש את התאוריה החדשה יש לבצע ניסויים רבים, פשוטים יחסית, אשר יצריכו לבטח הרבה שנות מחקר ותקציבים. הבנה עמוקה יותר של משמעות הצבעים בטבע תתרום להערכתו במגוון רחב של שטחים כגון: ביולוגיה, פיסיקה, רפואה, טכנולוגיה עילית (הי-טק), טכנולוגית חלל, ועוד. אשמח לקבל הערות לגבי כל אחד מהרעיונות שהועלו ויועלו על ידי. אשמח לא פחות באם יצטרפו למחקר חוקרים נוספים מכל התחומים כדי שיחד נביא לשינוי הגישה האנושית אל הטבע למען עתיד האנושות ועתיד הטבע בכדור הארץ ומחוצה לו, אשר לאנושות יש השפעה עליהם.