

7 הראיות למוצא המינים באמצעות אבולוציה

א. מאובנים:

סוג חשוב (אך לא בלעדי) של ראיות נובע מהמאובנים הנמצאים בשכבות הקרקע השונות.

אך קודם לכן, מה הם בכלל מאובנים?

ובכן, "מאובנים" הם שרידים של יצורים חיים ש"הפכו לאבן". מבחינים בין כמה סוגים שונים של מאובנים:

1. **מאובן גלעין:** בעל חיים (או צמח) מת בסביבה מימית (בקרקעית הים או בביצה לדוגמה) ונקבר תחת המשקעים. בדרך כלל, החלקים הרכים של הגוף (הבשר והאיברים הפנימיים) נרקבים במהירות ומתפרקים, בעוד החלקים הקשים (השלד, הקונכיה, השיניים) נשמרים למשך זמן רב בהרבה. אולם גם חלקים אלה מתפרקים אט אט, והמולקולות המקוריות של חלקים אלה מוחלפות אחת לאחת במולקולות של מינרלים אחרים, יציבים יותר, המצויים במים. התוצאה הסופית היא העתק מושלם של השלד או הקונכיה המקורית, כאשר הוא אינו עשוי עוד מהחומרים המקוריים אלא ממינרלים לא־אורגניים. במקרים נדירים, מתאבנות גם רקמות רכות.

2. **מאובן דפוס** (חיצוני או פנימי): גם בבמקרים אלה מדובר ביצור שנלכד בין שכבות משקעים שהתקשו. אלא שבמקרים אלה, אחרי שהתקשו המשקעים שסביב היצור, התפרק היצור לחלוטין ונעלם (כתוצאה מתחמוצות המחלחלות בסלע) בהותירו אחריו חלל בסלע בדמותו (הדפס חיצוני). לפעמים מתמלא חלל זה בחומרי משקע המתקשים ויוצרים דגם תלת ממדי של היצור. ייתכן, כאמור, גם דפוס פנימי. קונכיה (או גולגולת) יכולה להתמלא במינרלים אשר יתקשו בתוכה ויקבלו את צורתה. הקונכיה עצמה (או הגולגולת) עשויה להתפורר ולהיעלם, ואנו נישאר עם ההדפס הפנימי: דגם תלת ממדי של הקונכיה שנוצר מבפנים.

3. **מאובן חותם:** מאובנים מסוג זה הם טביעות חותם על הסלע. כגון טביעות רגל באדמה רכה שהתקשתה ושימרה את הטביעות, או טביעות של צמח שהשאיר את חותמו.

4. **השתמרות החומר המקורי:** במקרים נדירים אלה נשמר החומר המקורי של היצור ולא הוחלף במינרלים. על מנת שיווצר מצב שכזה נדרשים תנאים מיוחדים, כמו השתמרות בסביבה צחיחה במיוחד, קפיאה מהירה, קבורה באספלט, וכן (במקרה של חרקים) - הילכדות בשרף של עצים שהתאבן לאחר זמן (ענבר). מאובנים אלה הם אפוא יצורים **שהתקשו** כאבן, בעוד המאובנים מהסוג הראשון הם יצורים ש"**הפכו** לאבן".

על מנת שיצור יתאבן נדרשים אפוא כמה וכמה תנאים, ובראש ובראשונה שהוא יהיה מוגן מפגעי מזג האוויר והבליה עד שיושלם תהליך ההתאבנות. דרישה מחמירה זו "קלה" יותר לביצוע במעמקי ים או ביצה, כאשר היצור שוקע לקרקעית ומתכסה בשכבה של משקעים המגנה עליו, מאשר ביבשה. ואכן, הרוב המוחלט של המאובנים מגיע מן הים (או ממקומות שהיו בעבר ים). כמו כן, רוב המאובנים הם של החלקים הקשיחים של הגוף: שלד פנימי או חיצוני, ומיעוטם משקף גם רקמות רכות.

נוסף על כך, על מנת שהמאובן יגיע לידינו, צריך שהוא ייחשף. דבר זה יכול להתבצע על ידי חפירות יזומות או חפירות לצורך בניה, או על ידי התרוממות טבעית של הסלע, או חשיפת השכבות העליונות של הקרקע על ידי תהליכי בלייה. במקרים אלה, האחרונים, עשוי המאובן להחשף ולהתפורר בשל אותם כוחות בלייה, לפני שיודע דבר קיומו. מובן אפוא שרק מיעוט שבמיעוט מהיצורים שהיו קיימים על פני האדמה הגיעו לידינו, ושתיעוד המאובנים אינו משקף אלא מדגם ממה שהיה.

למרות כל זה, נמצאו עד כה אינספור מאובנים. הערכה היא שמספר **המינים השונים** שנמצא להם תיעוד בממצאים המאובנים עומד על **כרבע מיליון**! מספר לא מבוטל.

מסתבר שהמאובנים ממש מספרים לנו את סיפורה של האבולוציה. הכיצד?

ובכן, האדמה, כאמור, עברה הרבה במהלך חייה, והיא עשויה שכבות שכבות. ארכיאולוג המתעניין בערים עתיקות עשוי לחפור שרידים של עיר, ומתחת לשרידים אלה למצוא שרידים של עיר עתיקה יותר, ומתחת לה - שרידים עתיקים

עוד יותר, כשבין עיר לעיר יש שכבת אדמה שהצטברה על חורבות העיר הקדומה והפכה אותה ל"תל". ארצנו משופעת בערים עתיקות שכאלה, בנות אלפים רבים של שנים. אולם איננו מתעניינים פה בשכבות בנות אלפי שנים, אלא בשכבות עתיקות עוד יותר. וכאשר אנו בודקים את השכבות העתיקות יותר, ואת המאובנים שאנו מוצאים בהן, אנו מגלים סדר מופתי בממצאים התואם בדיוק מה שהיינו מצפים למצוא לפי מיון בעלי החיים שדיברנו עליו לעיל, והתואם בדיוק את מה שהיינו מצפים למצוא לפי האבולוציה וניבוייה.



מאובני אדם

המוזיאון לאוסטאולוגיה (חקר העצמות) של אוקלהומה סיטי

כיצד יודעים אנו שאנו "חוזרים בזמן"?

ההבנה שאנו חוזרים בזמן מבוססת על שני גורמים. ראשית, בדרך כלל שכבות מצטברות אחת על השניה בסדר כרונולוגי, זאת אומרת: ככל שהשכבה עליונה יותר - היא צעירה יותר, וככל שהיא עמוקה יותר - היא עתיקה יותר. הגיוני.

אמנם, מלבד ההיגיון שבדבר, עומדות לרשותנו שיטות של תיארוך ישיר של השכבות באמצעים שמנתי לעיל, כאשר הראשית שבהן היא התיארוך הרדיומטרי. העובדה שבכל רחבי העולם אנו מוצאים סדר דומה: כלומר, השכבות מסודרות לפי אותו הסדר, מאובנים דומים נמצאים בשכבות דומות ברחבי העולם, שינויים בשדה המגנטי שמתועד בסלעים מופיעים בצורה מתואמת ברחבי העולם ועוד, מקילה על התיארוך המדויק של השכבות. למעשה, המתאם בין סוגי השכבות לבין הממצאים המאובנים הוא כה גדול, עד שעל מנת להקל על זיהוי מהיר של שכבות, משתמשים ב"מאובנים מנחים", זאת אומרת, מאובנים שהם בעלי תפוצה רחבה וכלל עולמית, ואשר התקיימו פרק זמן "קצר" כמו מיליון שנה (זה נחשב קצר במונחים גיאולוגיים). גילוי מאובנים כאלה בשכבת אדמה מצביעה על זיהוייה של השכבה הזו (זיהוי שניתן לאימות סופי על ידי השיטות הנוספות, כאמור).

למותר לציין שהבדיקות הללו אינן "אקדמיות" גרידא, והן משמשות בפועל לצורך מציאת מחצבים יקרי מציאות, כמו נפט, פחם ומחצבים אחרים. (ואם כבר הזכרנו את הנפט והפחם, תן דעתך למשמעות שיש להימצאותם של נפט ופחם בעולמנו: כמה זמן נדרש על מנת להפוך שרידים של יצורים ימיים לנפט, וכמה זמן נדרש על מנת להפוך שרידים של צמחי יבשה לפחם).

ומה מגלים לנו המאובנים? הבה ונעקוב אחר קבוצה אחת מוכרת: החולייתנים (בעלי החוליות).

עד לפני כחצי מיליארד שנים איננו מוצאים אף חולייתן בין כל המאובנים. אנו כן מוצאים שלל מאובנים של חסרי חוליות דווקא: טביעותיהם של מיקרואורגניזמים ותולעים (המאובנים הקדומים ביותר נכון לעכשו הם סימנים שהותירו אחריהם חיידקים באבן חול באוסטרליה מלפני 3.49 מיליארד שנה).⁶² עם זאת, איננו מוצאים בשכבות אלה אפילו לא עצם או שן אחת לרפואה, למרות שאלה הם השרידים שמשתמרים בצורה הטובה ביותר, בוודאי יותר טוב מתולעת. אדלג על התולעים הראשונים והמיתרניים ואקפוף ישר לשכבות "צעירות" יותר, בנות 420 מיליון שנה. בשכבות אלה אנו מוצאים כבר בעלי חיים בעלי עמוד שדרה - דגים. אך איננו מוצאים אף בעל חיים בעל רגליים. בשכבות שזמנן כמה עשרות מיליוני שנים מאוחר יותר, אנו מוצאים כבר יצורים בעלי ארבע גפיים דמויי דר-חיים. שכבות מאוחרות יותר מראות בעלי חיים המותאמים בשלמות לחיים על היבשה: זוחלים מסוגים שונים. ועדיין, שום סימן ליונקים ולעופות. לפני כמאתיים ושלשים מיליון שנה מתחיל עידן הדינוזאורים והללו משגשגים וממלאים את הארץ עד שרובם נכחדים לפני כששים וחמשה מיליון שנה, ואז אנו כבר פוגשים בעופות, וביונקים (שהופיעו אמנם על הבמה כבר לפני כן, אלא שרק בעקבות העלמות הדינוזאורים החלו לשגשג ולמלא את פני תבל).

זאת אומרת, יש לנו כאן תמונה מוזרה לפיה בתחילה לא היו בעולמנו יצורים בעלי עצמות, אחרי כן התקיימו כאן דגים, אחרי כן דרחיים, אחרי כן זוחלים, אחרי כן דינוזאורים ויונקים ועופות.

האבולוציה פירשה את הממצאים האלה כך: היצורים השונים שאנו רואים בתקופות השונות, שעשרות מיליוני שנים מפרידות ביניהם, לא "נחתו" סתם כך בעולם, ולא נבראו בצורתם זו, אלא **התפתחו** אלה מאלה. זאת אומרת, בעלי החיים הראשונים שהיו בעלי ארבע גפיים אך עדיין חיו בעיקר בים - התפתחו מדגים; בעלי החיים הראשונים שחילקו את זמנם בין הים ליבשה - התפתחו מיצורים אלה; בעלי החיים שעברו בשלמות לחיים על היבשה ("זוחלים") - התפתחו מאלה האחרונים; מאותם זוחלים שפרו ורבו על פני האדמה התפתחו הדינוזאורים - מחד, והיונקים - מאידך. ומן הדינוזאורים התפתחו העופות. (כמובן, חלק מהזוחלים

62 פוול, המאובן העתיק ביותר.

נשארו "בתוך הקבוצה", והתפתחו לסוגים שונים של זוחלים, כגון תנינים, לטאות ונחשים).

נשמע הזוי? האם דג קם בבוקר יום אחד והפך ליצור ההולך על ארבע? האם זוחל השכים קום והחליט שהוא יונק?

ובכן, ציינתי בדבריי שבין הקבוצות השונות מפרידות לפעמים **עשרות מיליוני שנים**. השינוי הוא **הדרגתי**, ומתפרס לפעמים על מיליוני דורות של בעלי חיים שמשתנים בהדרגה במאפיין זה או אחר, עד שכעבור מיליוני שנים השינויים המצטברים מאפילים על המוצא הראשוני.

ב. איה החוליות החסירות???

אך, אם כך הוא הדבר, האם לא היינו אמורים למצוא **יצורי ביניים**? יצורים שהם במחצית הדרך: בין דג - להולך על ארבע, בין זוחל - לדינוזאור, בין דינוזאור - לעוף, בין זוחל - ליונק? היכן הם יצורי הביניים הללו, "החוליות החסירות"? אנו זועקים. ואכן, טענה זו הופרחה לחלל האויר מאז פורסם ספר "מוצא המינים" לפני כמאה וחמשים שנה. אולם, הקורא ישמח לשמוע שבעיה זו, שאנו שומעים את הדיה גם בימינו אלה, נפתרה מזמן, ואכן, בהתאמה מושלמת לתיאור העולם על פי האבולוציה - נמצאו "החוליות החסירות" זה מכבר. המאובנים בכללם מציגים תמונה הדרגתית ומגוון עשיר מאד של דרגות ביניים, בין אם המדובר בדרגות ביניים שבין מחלקות שונות של בעלי חיים: דג - להולך על ארבע, דינוזאור - למעופף וכדומה, ובין אם המדובר בדרגות ביניים באותה המחלקה עצמה, כגון דרגות ביניים בין יונקים קדומים ליונקים בני זמננו. (ברצוני לציין שגם אלמלא התגלו חוליות הביניים לא היתה הזעקה והטענה מוצדקת, שכן תיעוד המאובנים הוא חלקי מעצם טיבו, וכפי שנראה להלן, נדרשו שש שנים של מאמץ מכוון וממוקד על מנת לחשוף את יצור הביניים שבין הדג למהלכים על ארבע, כך שגם אלמלא היה נמצא, לא היה הדבר מהווה בעיה וטענה. אלא שבפועל אנו נהנים כיום מפירות המאמץ העולמי ויכולים להציג לעין כול את "החוליות החסירות" שאינן חסירות עוד).

ואציג כמה דוגמות, לספקנים שבינינו:

1. דג - מהלך על ארבע

יצור שחציו דג וחציו הולך על ארבע? "רעיון" זה נשמע מופרך בראשיתו, שהרי הדג אינו יכול לנשום ולהתקיים על האדמה, ואילו יצורי היבשה אינם יכולים לנשום ולהתקיים בים. מעבר לכך, לדג יש סנפירים, וליצורי היבשה - גפיים. כיצד ניתן לגשר על פניהם?

ובכן, הדבר קל בהרבה ממה שזה נראה. אכן, דג מצוי אינו יכול לנשום ולהתקיים על פני האדמה. אבל דג ריאות יכול. דגי ריאות הם בעלי חיים שקיימים עדיין בימינו, ונפוצו הרבה יותר בעבר (לבעלי חיים מסוג כזה קוראים "מאובן חי", כי קל יותר למצוא מאובנים שלו מלמצוא את בעל החיים החי בימינו...). דגים אלה מצוידים **גם בזימים** - המאפשרים להם לנשום במים, **וגם בריאות** (ריאה אחת או שתי ריאות, קיימים כמה סוגים של דגי ריאות). ה"פיתוח" הזה מאפשר לדג לחיות במקורות מים העניים בחמצן, ולהשלים את תצרוכת החמצן שלו בנשימה מהאוויר. יתר על כן, דג הריאות האפריקאי והדרום-אמריקאי מסוגלים אפילו לשרוד **ביבשה** בעונת היובש. תכונה נוספת של דגים אלה (שאמנם לא ייחודית להם) היא יכולתם להשתמש בסנפירים על מנת לזחול על קרקעית האגמים הרדודים בהם הם חיים.

אמנם, דגי הריאות אינם יחידאים. ידועים כיום אחד עשר סוגים שונים של דגים המסוגלים לנשום ולהתקיים פרקי זמן מסוימים מחוץ למים, חלקם מסוגל לזחול ו/או לנתר על האדמה. דגים אלה נושמים אוויר באמצעות טכניקות ואיברי נשימה מגוונים.⁶³

לא קשה לנו לדמיין יצורים הדומים לדגי ריאות, המתחילים להתאים יותר ויותר לסגנון החיים של דוחיים: חיים הן בים והן ביבשה.

אולם, אין לנו צורך לאמץ את דמיונו במיוחד, שכן צוות חוקרים עשה בעבורנו את העבודה, ובמאמץ שנפרס על פני שש שנים הצליח לאתר את בעל החיים שהיה הגשר למעבר בין הים ליבשה: הטיקטאליק.⁶⁴

ואתאר בקצרה את סיפורו של הטיקטאליק, מאחר ויש בכך לקח חשוב, שכן מעבר לעובדה שייצור הביניים הזה אכן נמצא, הרי שהדבר בה הוא נמצא התבססה על הידע המצטבר ועל תמונת העולם של האבולוציה.

63 לפרטים נוספים ראה כאן: http://en.wikipedia.org/wiki/Amphibious_fish

64 סיפורו של הטיקטאליק מתואר בפרוטרוט בספר "הדג שבתוכנו" מאת ניל שובין.

החוקר שהוביל את המחקר ושם לו למטרה למצוא את צורת הביניים הזו, ידע, על סמך תגליות קודמות, שבסלעים בני 365 מיליון שנה אנו מוצאים כבר בעלי חיים בעלי גפיים החיים על היבשה. כמו כן, הוא ידע שבסלעים שגילם 385 מיליון שנה נמצאו רק דגים. (בפרט, בשכבות סלע בנות 380 מיליון שנה, נמצא הדג *Eusthenopteron*, שבסנפיר שלו הופיע כבר המבנה של עצם אחת המחוברת לשתי עצמות, בדומה לעצם הזרוע המחוברת לכישור ולגומד, אמנם בלי ה"המשך" של אצבעות). בעקבות הפרשנות האבולוציונית, הרואה את בעלי הגפיים כבעלי חיים שהתפתחו מדגים, הסיק החוקר שיצור הביניים שאותו הוא מחפש, ואשר מהווה גשר בין עולם הדגים לעולם יצורי היבשה, חייב להסתתר בסלעים שגילם נע בין 365 ל-380 מיליון שנה בערך.

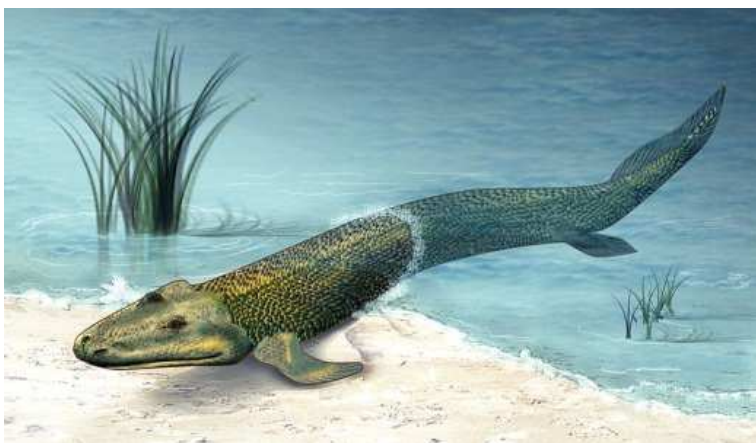
השלב השני היה למצוא אזור בעולם שבו נמצאים סלעי משקע בני הגיל הזה באופן החשוף לפני הקרקע, וזאת על סמך מפות גיאולוגיות העוסקות בנתונים אלה. משנמצא המקום: בקנדה הארקטית, החל איסוף הממצאים, ובסופן של שש שנות חיפושים התגלו שרידיו של יצור הביניים, שקיבל את השם טיקטאליק.⁶⁵

יצור זה, שנשמר בצורה מצוינת, היה דג בעל סנפירים עם קרומי שחיה וקשקשים על הגב, אך מצד שני היו לו ראש שטוח וצוואר (בדומה קצת לתנין. לדגים "רגילים" אין צוואר, והם אינם יכולים להרים את ראשם), ובתוך הסנפיר היו עצמות המקבילות לעצמות הזרוע, האמה ולחלקים מפרק כף היד. גם מפרק הכתף, המרפק וכף היד נכחו - בתוך סנפיר מצויד בקרומים. היצור נמצא בתוך סלעים שנוצרו בנהרות קדמוניים לפני 375 מיליון שנה. מסתבר שהוא השתמש בסנפיריו גם כדי "לזחול" על הקרקע הרדודה של הנהרות, והשתמש בצווארו על מנת להרים את הראש מעל למים ולנשום אויר.

כפי שציינתי, לא זו בלבד שיצור הביניים בין שתי הצורות השונות כל כך, נמצא, אלא שהוא נמצא **בדיוק בזמן ובמקום** שבו ניבתה האבולוציה שהוא יימצא.

65 משמעות השם "דג גדול של מים מתוקים" בשפת האינוקטיטוט של בני חבל הנונאוט אשר בו נמצא הדג. (שובין, הדג שבתוכנו, עמ' 38).

הראיות למוצא המינים באמצעות אבולוציה



טיקטאליק

הממצא, ושחזור אמנותי. (© Esv 2010, derivative work: Petter Bøckman)

2. דינוזאור - עוף

מה לגבי המעבר בין דינוזאור לעוף?

כמה מילים על דינוזאורים: כשמזכירים את השם "דינוזאור" עולה לנגד רוחנו יצור ענק ואימתני, כפי שמורה שמו (ביוונית: דינוס זאורוס - לטאה נוראית). ואכן, חלק ממניי הדינוזאורים הגיעו למימדי ענק [הדינוזאור השלם הארוך ביותר שבידינו הוא הדיפלודוקוס (Diplodocus) בן 27 המטרים], אם כי אף אחד מהם לא הגיע למימדי הלוויתן הכחול בן זמננו. אולם, הדינוזאורים היוו קבוצה מגוונת מאד של בעלי חיים, ששגשו בהצלחה במשך כמאה וששים מיליון שנה (פלוס מינוס). מלפני כ-230 מיליון שנה עד ל-65 מיליון שנה לפני ההווה), ומילאו גומחות רבות על פני היבשה. מאות רבות של מיני דינוזאורים תוארו בפרוטרוט וניקבו בשמות, ועוד מאות מינים נמצאים עדיין בתהליכי בדיקה (מתן שם מדעי מצריך ידיעה מדויקת על קרבתו המשפחתית של המין המסוים ליתר המינים הקרובים לו). מיני הדינוזאורים השונים מקובצים לשתי סדרות, וכל סדרה מחולקת לכמה קבוצות. (ראה איור בעמוד הבא).

מה כל זה קשור לעופות?

ובכן, מסתבר שמבנה השלד של העופות דומה במאפיינים רבים מאד למבנה השלד של הדינוזאורים [מקבוצת התרופודים (Theropods), קבוצה שמנתה גם דינוזאורים בגודל של יונה!]⁶⁶ נוסף על כך, התגלו מעל לעשרים מינים שונים של דינוזאורים שהיו להם נוצות (שהוא המאפיין המגדיר כיום את העופות: הוא קיים רק בעופות, ובכל עשרת אלפים מיני העופות). ברוב המקרים, נוצות אלה לא שימשו לתעופה, אך נמצאו גם דינוזאורים קטני מימדים שלהם נוצות-כנף בגפיים הקדמיות והאחוריות (וניתן להחשיבם אפוא כבעלי ארבע כנפיים).

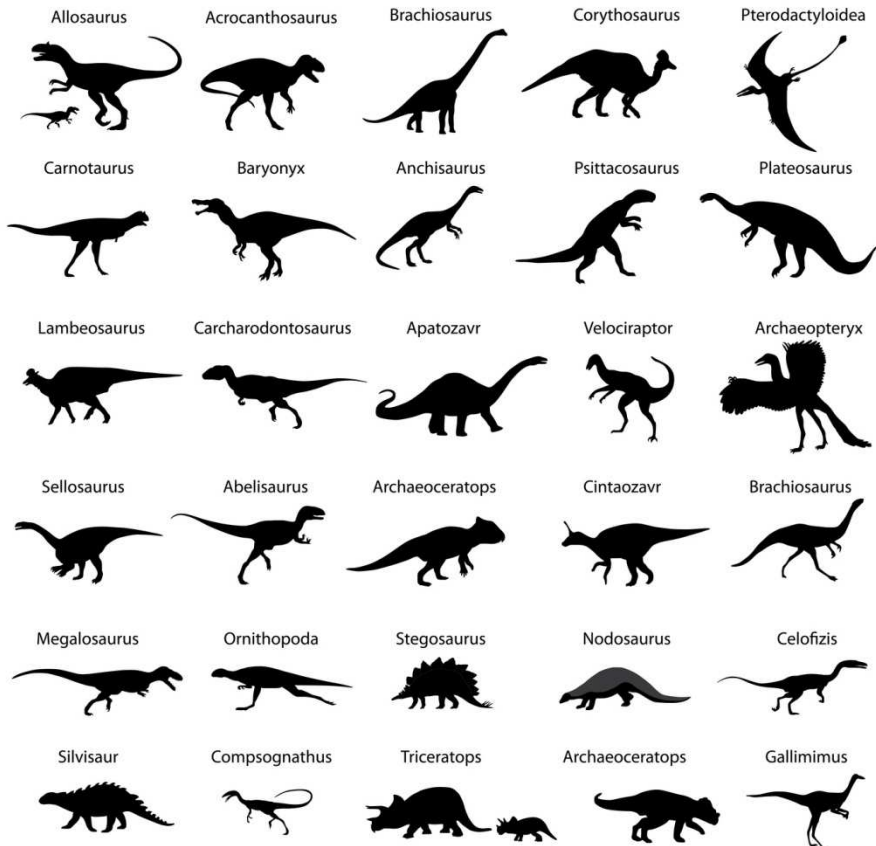
הדמיון בין הדינוזאורים לעופות אינו "מתמצה" בדמיון שלהם בשלד ובנוצות, אלא בא לידי ביטוי גם במבנים אחרים בגוף, וגם בהתנהגות, כגון צורת הקינון והשינה.

ממצא מרתק במיוחד נבע מגילוי שרידים של הדינוזאור מטיל האימה *Tyrannosaurus rex* שאיפשרו השוואה של האנטומיה של התא והשוואת רצף החלבונים. השוואה זו לימדה שהעופות הם שארי בשרו הקרובים ביותר של

66 זאנג וחב', מנירפטורה.

הראיות למוצא המינים באמצעות אבולוציה

דינוזאור זה כיום, אף יותר מאשר התנינים (שהם שארי הבשר השניים במעלה). השוואה של רצפים שהופקו מדינוזאור מסוג אחר הניבו אף הן תוצאות איתנות על הקשר בין הדינוזאורים לעופות.⁶⁷



עולמם המגוון של הדינוזאורים

67 הקרן הלאומית למדע, הקשר בין דינוזאורים לציפורים.

נקודה מעניינת בנושא זה היא העדר השיניים בקרב העופות. לפי הטענה שהעליתי זה עתה, מוצא העופות בדינוזאורים, שהיו בעלי שיניים. (יתר על כן, גם יצורי הביניים שתיארתי עתה, הדינוזאורים המנוצים ובעלי הכנפיים, היו בעלי שיניים). ובכן, בהתאם למצופה, נמצא שלא זו בלבד שלאבותיהם של העופות היו שיניים, אלא שאף בעופות נטולי השיניים בני זמננו קיים עדיין המידע הגנטי הנדרש ליצירת שיניים (אלא שהוא מושק, בנסיבות הרגילות). לפני שנים אחדות הבחין אחד החוקרים בכך שעובר של תרנגול אשר נבדק במעבדתו עבר מוטציה והתחיל להצמיח שיניים - ולא סתם שיניים, אלא שיניים הדומות לשיני תנין (כזכור, התנינים הם שארי הבשר החיים הקרובים ביותר לעופות, כיום). החוקר הינדס וירוס המחקר את האותות המולקולריים של המוטציה האמורה והצליח לגרום לתרנגולים רגילים להצמיח שיניים דומות.

(אגב, אין לבלבל בין עופות דינוזאורים קדומים אלה לבין יצורים מעופפים אחרים השייכים לסדרת הפטרוזאורים. לפי הידוע כיום, יצורים אלה, שהתפתחו מהזוחלים לפני כ־220 מיליון שנה, הם החולייתנים הראשונים שפיתחו כישורי תעופה. הם לא היו מנוצים, והם עפו באמצעות קרומי עור שהיו מתוחים בין ארבעת גפיהם).



פטרזאור

לעומת הדינוזאורים המנוצים, עף הפטרזאור באמצעות קרומי עור המתוחים בין גפיו, באופן המזכיר במידת מה את כנפי העטלף.

הראיות למוצא המינים באמצעות אבולוציה



ארכיאופטריקס (© H. Raab, 2009)

גם בתצלומים ניתן לראות בקלות את הנוצות, ואת הזנב המנוצה דמוי העלה



יען ודינוזאור - ההבדל אינו תהומי

מה ההיגיון בפיתוח חצי כנף?

בקטע הקודם הובאה הטענה שהעופות התפתחו מדינוזאורים, וכי ראשוני הדינוזאורים ש"פתחו" במסלול זה היו מנוצים אך לא מעופפים. לאור זאת, נשאלת השאלה: לשם מה היו לדינוזאורים הקדומים נוצות? מה תועלת יש בנצות שמאפשרות "כמעט תעופה"? התשובה פשוטה למדי: נוצות משמשות לצרכים נוספים, לא רק לתעופה. ביבשת אנטארקטיקה, לדוגמא, נמצא את הפינגווינים, שהם עופות לא מעופפים, המצליחים לשרוד במקום הכי קר על פני האדמה בין השאר בזכות הבידוד המעולה שמעניקה להם כסות הנוצות. יונקים בעלי פרווה לא הצליחו לכבוש את היעד הזה למרות שהם חיו בו בעבר הרחוק כאשר אנטארקטיקה לא היתה קפואה.

נוצות ארוכות יותר ומבנים דמויי כנף משמשים בהצלחה רבה לצורך דאיה וניתור באויר. עשרות מינים של בעלי חיים – יונקים, זוחלים, דוחיים ואפילו דגים⁶⁸ (!) משתמשים במגוון אמצעים על מנת לדאות ממקום אחד למשנהו (חלקם דואים למרחק של מאות מטרים!). בין אם המדובר בקרומים המתוחים בין רגליהם, בין אצבעותיהם, מסביב לצווארם ועוד. הדאיה נפוצה מאד בעולם החי, וגם נוצות שאינן מקנות תעופה אמיתית מסייעות מאד לכישורי דאיה.



(© Patrick Coin, 2007)



דגים מעופפים

דוגמות אחרות:

לא ארחיב בדוגמות נוספות על מעבר ממחלקה למחלקה, משום שהן הרבה פחות "מרתקות". שכן ההבדלים בין דוחיים לזוחל, בין זוחל לדינוזאור, בין זוחל ליונק, אינם באים לידי ביטוי בתופעות הבולטות לעינו של הקורא שאינו עוסק בתחום. ההבדלים בין בעלי חיים אלה באים לידי ביטוי במבנה העצמות כגון: עצמות הפנים הקטנות על צורתן ומיקומן המדויק; מבנה האגן, מבנה מפרקי הגפיים, מבנה

68 דגים ממשפחת הדאונים (Exocoetidae) מצויים בסנפירים ארוכים המשמשים אותם גם ככנפי דאיה. הם מסוגלים לקפוץ ולדאות עד גובה של 6 מטרים (פין, סנפיר, עמ' 4-7) ולהגיע למהירות של 70 קמ"ש (קוצ'רה, דגים דואים, עמ' 59-77). ראה ערך "תעופת בעלי חיים" בויקיפדיה למידע נוסף.

השיניים וכדומה. אסתפק בציון העובדה שגם בין מחלקות שונות אלה של בעלי חיים נמצא מגוון של צורות ביניים ("חוליות שאינן חסירות") המדגימות את צורות המעבר: יצורים שהם באמצע הדרך בין דוחיים לזוחל, בין זוחל ליונק וכו'. כנגד זה, אביא שתי דוגמות על התפתחות ברמה של המין.

3. התפתחות הסוס

ניקח לדוגמה את הסוס: כולנו מכירים את סוס־הבית בן ימינו. בעל חיים גדול זה מותאם באופן מושלם לריצה בשטחים פתוחים על אצבעו הגדולה האחת המוגנת בפרסה, ושיניו מותאמות לאכילת עשב. לסוס יש בעצם שלוש אצבעות: אצבע אמצעית אחת מפותחת וגדולה (אצבע מספר שלוש), ושתי אצבעות מנוונות אשר נותרו מהן רק שרידים. מאחר וכף היד "הבסיסית" מכילה חמש אצבעות (בין אם זו כף ידו של צפרדע, עטלף, לוייתן, אדם או לטאה), אנו יכולים כבר לשער שלא תמיד היו לסוס רק אצבע אחת מתפקדת ועוד שני בדילי אצבעות. מה גם שבדילי האצבעות מרמזים לנו על עבר מפואר יותר.

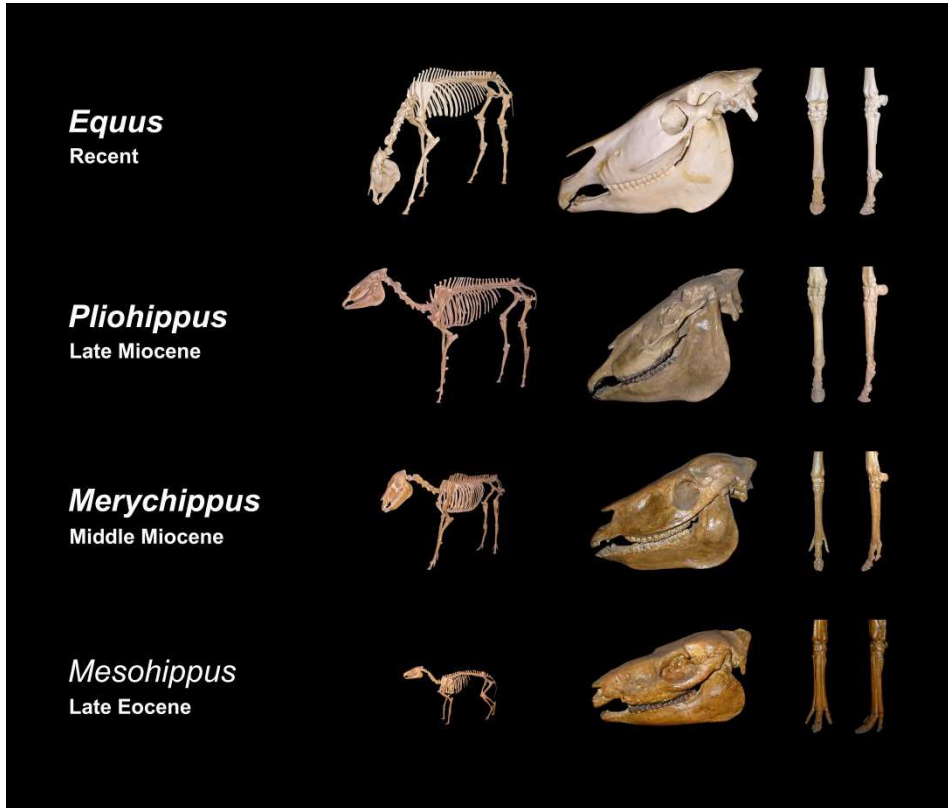
ואכן, ככל שאנו מרחיקים אחורה בזמן ובודקים את אבות אבותיו של הסוס, אנו מגלים רצף של בעלי חיים דמויי־סוס, אשר ככל שחולף הזמן הולכים ונעשים דומים יותר ויותר לסוס של ימינו. הם נעשים גדולים יותר, שיניהם עוברות שינויים ותהליכים הדרגתיים ככל שהם עוברים מתזונה צמחית טרופית לתזונה המבוססת על עשב, ובד בבד הם הולכים ומאבדים את אצבעותיהם, מאריכים את רגליהם ונעשים מותאמים יותר לריצה בשטחים פתוחים.

כמות הממצאים מרשימה מאד, שכן אבותיהם של הסוסים שגשגו בעולם הקדום. לפני למעלה מחמישים מיליון שנה הם נפוצו בעיקר ברחבי אמריקה הצפונית, והותירו בה את חותמם בדמות אלפי שלדים מאובנים. בעל החיים הראשון שניתן לזהויו כאביו הקדום של הסוס הוא האיוריהפוס (*Eohippus*), שם מדעי: (*Hyracotherium*), שחי לפני חמישים ושניים מיליון שנה. האיוריהפוס היה בעל חיים בגובה 40 ס"מ, והיה בעל ארבע אצבעות מפותחות ברגלים הקדמיות (ו"אצבע מספר 1" מנוונת), אף שנשא את משקלו על אצבע מספר שלוש דווקא. תוך שני מיליוני שנים, משתנה האיוריהפוס בהדרגה והופך לאוריהפוס

(*Orohippus*)⁶⁹ לבעל חיים זה ארבע אצבעות בכפות הרגליים הקדמיות, ושלוש באחוריות. האצבעות המנוונות - נעלמו. ההבדל העיקרי בין האיוריופוס לאורוהיפוס הוא בשינויים שחלו בשיניים והתאמתן הגוברת והולכת לרעייה. המשכן, האפיהיפוס (*Epihippus*), לפני כ-47 מיליוני שנה, ממשיך את מגמת השינויים בשיניים. לפני 30-40 מיליון שנה השתנה האקלים באמריקה הצפונית ונעשה יבש יותר, ובעקבות כך פני השטח הפכו דומים יותר לערבות של ימינו. באותו זמן אנו פוגשים את המזוהיפוס (*Mesohippus*), המותאם יותר מאבותיו לריצה בשטח פתוח ולרעייה של צמחים נוקשים. גובהו היה כ-60 ס"מ, והיו לו שלוש אצבעות בלבד, ושריד מנוון וזעיר של אצבע מס' 5. וכך ככל שעובר הזמן אנו נתקלים ב"דמויי סוס" שונים: מיוהיפוס, קלובטיפוס, פרהיפוס ועוד כהנה וכהנה. אדלג עליהם למען הקיצור ואגיע סמוך לזמננו. לפני כשלושה וחצי מיליוני שנה חי האב הקדום של הסוג סוס⁷⁰ (*Equus*), אביהם של הסוסים, החמורים והזברות של ימינו (נוסף על מינים נוספים שנכחדו). אגב, עצמותיו של האב הקדום הזה התגלו על ידי בוקר בעיר הגרמן, איידהו. בעקבות חפירות שנערכו במקום נמצאו חמשה שלדים כמעט שלמים של בעל חיים זה, ומעל מאה גולגולות. הדעה הרווחת היא שעדר סוסים טבע בניסיון לחצות נהר שעלה על גדותיו, ונקבר בקרקע הנהר.

69 מק'פדן, ניתוח קלדיסטי.

70 באופן מבלבל, אין בעברית הבחנה מספקת בין הביטוי "סוס" כשם הסוג הכולל כאמור גם את החמורים והזברות, לעומת בעל החיים הידוע בשם זה שנקרא ליתר דיוק "סוס הבית" (*Equus ferus caballus*). החמור, סוס הבית והזברה הם כמובן מינים שונים, אלא שכולם שייכים לסוג *Equus*, הנקרא בעברית "סוס". להרחבה בנושא השמות המדעיים וסיווג בעלי החיים, ראה לקמן בפרק על הטקסונומיה.



שלבים בהתפתחות הסוג סוס (© H. Zell, 2010)

4. התפתחות הלוויתן

ומה לגבי הלוויתן? הזכרתי בראש דבריי שקיימת סדרה של מאובנים המדגימה את שלבי הביניים של יצור מרהיב זה.

הלוויתן, מלבד העובדה שהוא נעדר רגליים אחוריות (בדרך כלל), נבדל מיתר היונקים בכמה תכונות, וביניהן: גפיים קדמיות המעוצבות כמושטים, נחיר במעלה הראש, צוואר קצר, שיניים פשוטות דמויות חרוט, מבנה מיוחד של האוזן המאפשר שמיעה מתחת למים, ועמוד שדרה התומך בשרירי השחיה החזקים של הזנב.

כזכור, הלוויתן הוא יונק לכל דבר. בראשיתו של ספר זה ציינתי כמה מן המאפיינים המובהקים המשייכים אותו למחלקה זו (ביניהם: אי יכולת לנשום במים, יניקת חלב, הצמחת שיער, קולטני ריח של בעל חיים יבשתי ואולי המרשים מביניהם: הצמחה, מפעם לפעם, של רגליים אחוריות). אבות אבותיו של הלוויתן חיו על היבשה והם שארי בשר של יונקים אחרים. אולם, למי הם קרובים יותר מכל?

כבר לפני ששים שנה זיהו חוקרים את הקשר בין הלוויתן לבין מכפילי הפרסה דווקא, וזאת, עוד לפני שעמד לרשותם הידע הגנטי, אולם הם לא יכלו להצביע על הקרבה המדויקת. כיום, בעקבות השוואת המטען הגנטי ובעקבות מאובנים נוספים שנמצאו נעשתה התמונה ברורה יותר, וניתן לעקוב אחר התפתחותן של כל התכונות המיוחדות הללו שציינתי כאן. ואציג כאן חלק מהנתונים:⁷¹

בתקופה שלפני 53 מיליון שנה, מוצאים אנו את הפקיצטוס (*Pakicetus*), יצור בעל פרסות בגודל של כלב. יצור זה לא היה לווייתן, אך היו לו מאפיינים מסוימים ששרדו כיום רק בלווייתנים (בין חיים ובין מאובנים), בעיקר במבנה האוזן הפנימית ובמבנה השיניים. מלפני 50 מיליון שנה אנו מוצאים כבר את האמבולוצטוס (*Ambulocetus*, משמעות שמו: "לוויתן מהלך"), יונק שנראה כמו תנין, ואשר רגליו האחוריות היו מותאמות לשחיה בים, יותר מאשר להליכה על פני היבשה. עם זאת, רגלי השחיה הללו הסתיימו עדיין בפרסות (!) והסגירו את מוצאו הקדום. מין דומה לו הוא הרמינגטונוצטוס (*Remingtonocetus*). הרודוצטוס (*Rodhocetus*), בעל חיים שחי לפני כ-46 מיליון שנה ואשר מאובניו נפוצים ברוב היבשות, הלך צעד אחד קדימה. מלבד המאפיינים הלווייתניים שהיו כבר אצל קודמיהם, נוסף אצלו מבנה קרסול שקיים רק בלווייתנים. עמוד השדרה והגפיים הותאמו עוד יותר לשחיה, והנחיריים כבר אינן נמצאות בקצה האף, כמו ביתר היונקים, אלא במעלה החרטום, בערך במחציתו (תכונה שמסייעת לבעל החיים לנשום מבלי שיצטרך להוציא את קצה החרטום מהמים). הבזילוזאורוס (*Basilosaurus*) והדורודון (*Dorudon*) חיו בערך לפני 38 מיליון שנה. הראשון היה בעל חיים גדול, באורך 18 מטרים, והשני באורך 5 מטרים. בעלי חיים אלה היו כבר יונקים ימיים "גמורים", ורגליהם האחוריות היו זעירות ביחס לגופם, והחיבור ביניהם לעמוד השדרה היה רופף עוד יותר מאצל קודמיו. גפיים אלה לא יכלו לשמש לתנועה. אמנם יצורים

71 בעקבות קוין, למה האבולוציה נכונה, עמ' 100-102.

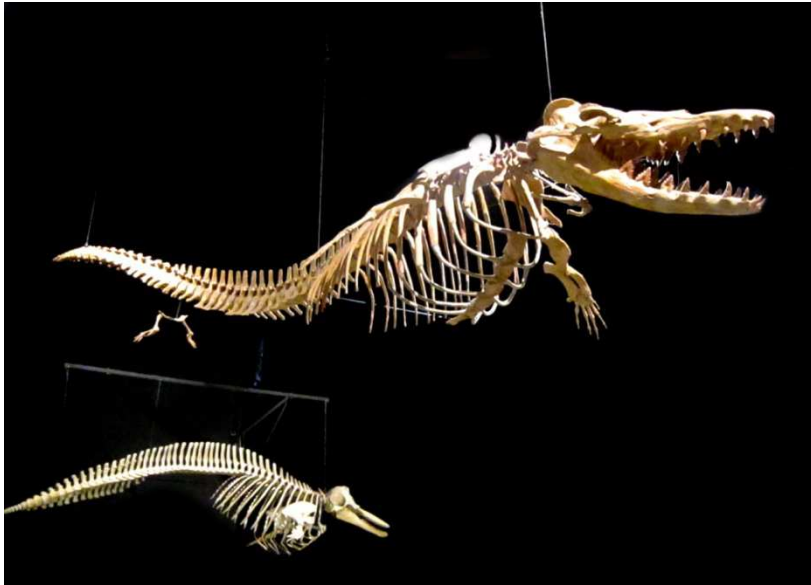
אלה שונים בכמה מאפיינים מהלווייתנים, כגון במוחם הקטן, ובאי יכולתם להפיק את הקולות המיוחדים המופקים על ידי הלווייתנים המודרניים, וייתכן שהם נפרדו בשלב מסוים מאילן היוחסין שמוליך ללווייתנים המודרניים והתפתחו בכיוון עצמאי. הסקולודון (*Squalodon*) שחי בתקופה שבין 33 ל-14 מיליון שנה בעבר, היה כבר דומה מאוד לדולפינים של ימינו, והנחיר שלו היה כבר במעלה הראש (הנחיר הוא אותו נקב מפורסם שיש ללווייתנים ולדולפינים במעלה ראשם ואשר ממנו פורץ אותו סילון אדי מים כשהלווייתן מרוקן את ריאותיו).

הלווייתנים עצמם התפצלו לפני כ-35 מיליון שנה לשתי קבוצות עיקריות: לווייתני המזיפות (שאיבדו את שיניהם ואשר ניזונים באמצעות סינון פלנקטון מהמים) ולווייתני שיניים, והם כוללים כיום עשרות מינים שונים.⁷²

צינתי לעיל שלפני ששים שנה הוערך שהלווייתנים הם שארי בשר של מכפילי הפרסה. כאמור, השוואות גנטיות עדכניות העלו ששאר הבשר הקרוב ביותר של הלווייתנים הוא ההיפופוטם (שאכן כלול בסדרת מכפילי-הפרסה).⁷³ לפי ההערכות הקיימות כיום, חולקים הלווייתנים וההיפופוטמים אב קדום שהתפצל מיתר מכפילי הפרסה לפני כ-60 מיליון שנה, והתפצלו זה מזה לפני כ-54 מיליון שנה.

72 בנוגע למעבר משיניים רגילות למזיפות, מעניין לציין את כלב הים הנמרי (*Hydrurga leptonyx*), אשר עושה שימוש בשתי טכניקות הציד. כלב הים הנמרי הוא מצד אחד טורף-על הניחן בניבים מרשימים בהם הוא צד פינגווינים וכלבי ים, ומצד שני הוא מצויד בשיניים טוחנות היוצרות חומה צפופה והמשמשות אותו לסינון קריל. תופעה זו שופכת אור על הדרך האפשרית ש"פסעו" בה לווייתני המזיפות. (הוקינג, כלב ים נמרי. ראה גלילאו גיליון 173).

73 סיינס דיילי, לווייתן והיפופוטם.



דורודון (© by Ellen, 2010)

שלד שלם של דורודון (*Dorudon atrox*) שנחשף בחולות מצרים (Wadi Hitan). הגפיים האחוריות זעירות ומנוונות.

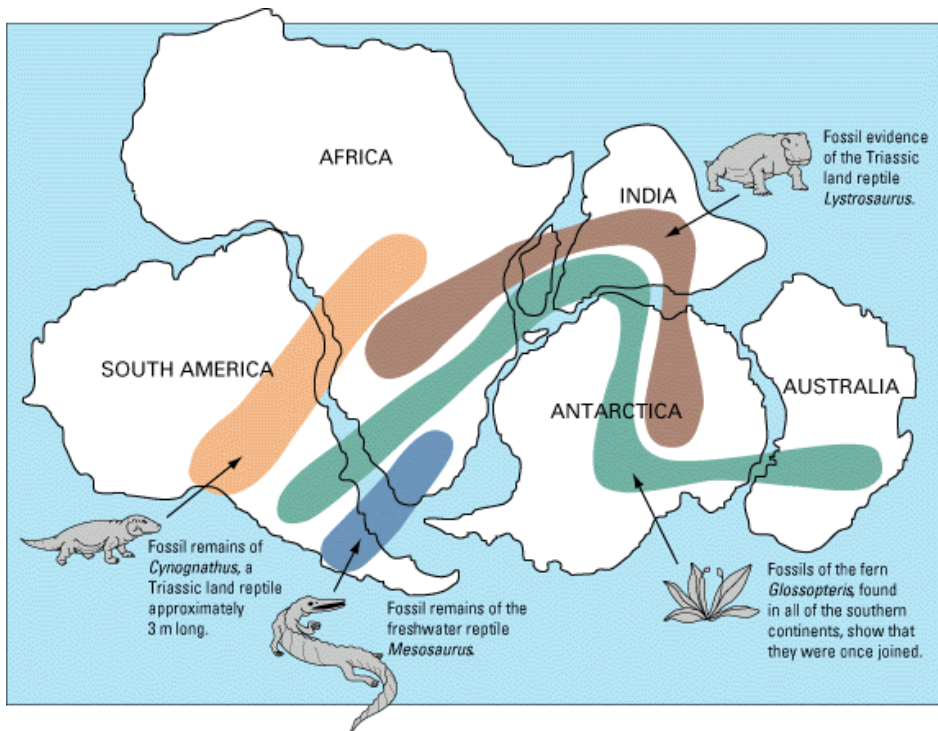
כמה פרטים נוספים הקשורים לנושא המאובנים:

5. תפוצת מאובנים ביבשות הקדומות

ציינתי לעיל את העובדה שכאשר אנו בודקים את המאובנים שנמצאים באמריקה הדרומית ובאפריקה מהתקופה שיבשות אלו היו עדיין מחוברות ליבשת אחת - אנו מוצאים בהן אותם המאובנים. כאשר אנו בודקים את המאובנים מהתקופות שאחרי כן, מעת שיבשות אלה הופרדו כבר על ידי האוקיינוס, אנו מוצאים מאובנים **שונים** בכל יבשת, משום שבכל יבשת התפתחו בעלי החיים בכיוונים שונים.

תופעה זו אינה מוגבלת ליבשות אלה. ברחבי העולם אנו מוצאים מאובנים זהים במקומות שונים שהיו מחוברים בעבר הרחוק. בין הבולטים במאובנים אלה ניתן למנות את ה־*Cynognathus*, זוחל שנפוץ במרכז אמריקה הדרומית ובאפריקה; את ה־*Lystrosaurus*, זוחל גם הוא, שנפוץ באזור דרומי יותר באפריקה, במדגסקר, בהודו ובאנטארקטיקה; הצמח *Glossopteris*, שנפוץ באזור עוד יותר דרומי באמריקה הדרומית, באפריקה, מדגסקר, הודו, אנטארקטיקה ואוסטרליה; וזוחל ימי בשם *Mesosaurus*, שנפוץ בקצה הדרומי של אמריקה הדרומית ואפריקה.

תפוצתם של בעלי חיים וצמחים אלה מחזקת את מה שידוע לנו על התהליכים הארוכים והתמורות שעברו היבשות במהלך מאות מיליוני השנים שעברו.



תפוצת המאובנים ביבשות הקדומות

קחו לדוגמא את החיבור בין אמריקה הדרומית לאפריקה: שני בעלי החיים והצמח שבמפה כאילו "תופרים" את שתי היבשות במדויק.

6. חיות הכיס

כולנו מכירים את הכיס המיוחד של הקנגרו בו שוכן צאצאו הרך. תכונה זו אינה ייחודית לקנגרו והוא חולק אותה עם עוד כשלוש מאות מינים שונים של חיות כיס (כגון הקואלה). בקרב בעלי חיים אלה, משך ההריון הוא קצר במיוחד, והולדות נולדים לא מפותחים, והם משלימים את התפתחותם במשך שהות של כמה חודשים בכיס המיוחד להם, ואשר בו בלוטות חלב המיועדות להזנתם.

כמאתיים מהמינים השונים של חיות הכיס מצויים באוסטרליה ובאיים השוכנים צפונה לה, וכמאה מינים נמצאים באמריקה (הדרומית, בעיקר).

לפי הממצאים כיום, המאובן הקדום ביותר של חית כיס מוצאו מסין בתקופה שלפני 125 מיליון שנה. מבדיקת המאובנים ברחבי העולם עולה ההערכה הבאה: חיות הכיס התפתחו באסיה; עברו משם לאמריקה הצפונית בזמן שהיתה עדיין מחוברת לאירואסיה; משם עברו לאמריקה הדרומית (שהיתה עדיין מחוברת לאמריקה הצפונית עד לפני 65 מיליון שנה. יצוין שאחר כך היא נפרדה, וכיום היא שוב מחוברת); משם עברו חיות הכיס לאוסטרליה דרך אנטארקטיקה לפני כ-50 מיליון שנה.

חיות הכיס הפסידו בתחרות עם יתר היונקים ונכחדו מרוב המקומות שנכחו בהם. (גם מאה המינים שנמצאים באמריקה הם כאין וכאפס לעומת מגוון היונקים האחרים המצויים בה). דווקא באוסטרליה המבודדת והמנותקת אליה הגיעו "באחרונה", מצאו חיות הכיס מקום לתקוע בו יתד שכן הם היו היונקים היחידים שהגיעו ליבשת זו, ואכן הם התפתחו למגוון צורות וגדלים, ומילאו את כל התפקידים והגומחות שממלאים יתר היונקים בשאר רחבי העולם: קנגורים כממלאי תפקיד האנטילופות, קואלות במילוי תפקיד העצלן, זאב טסמני כטורף (הזאב הטסמני, המכונה גם נמר טסמני, היה יצור בעל מבנה דומה לזאב ופספוס כשל טיגריס על מחציתו האחורית. נכחד ככל הנראה בשנות השלושים של המאה הקודמת) ועוד.

הטענה שחיות הכיס הגיעו לאוסטרליה מאמריקה הדרומית דרך אנטארקטיקה התבססה על תיארוך המאובנים שנמצאו ועל הנתונים שיש בידינו על מיקומן של היבשות לפני עשרות מיליוני שנה. בהתאם לטענה זו ניבו החוקרים בעבר שאם יושקע המאמץ הנחוץ יימצאו מאובנים של חיות כיס באנטארקטיקה.

ואכן, בעקבות ניבוי זה נערכו חיפושים ביבשת הקפואה והניבו לפני כשלושים שנה מאובנים של חיות כיס. מאז ועד היום הולכים ונחשפים מינים שונים של חיות כיס מאובנות ביבשת זו.

7. המסקנה מהממצאים המאובנים

בניגוד למה שמקובל לחשוב, ההוכחה לאבולוציה אינה מבוססת על הממצאים המאובנים דווקא, אלא על יסודות אחרים שיפורטו להלן. אמנם המאובנים מהווים חיזוק ואישור משמעותי לאבולוציה בכך שהם שוטחים בפנינו את מהלך ההתפתחות כפי שהיא אמורה להיות לפי האבולוציה: שינוי וגיוון הדרגתיים של עולם החי, מצורות קדומות לצורות מאוחרות יותר, בהתאם לתנאי השטח המשתנים. כאשר השינויים הללו "מצייתים" לסדר שתיארה האבולוציה (דגים ואח"כ הולכי על ארבע; זוחלים ואח"כ דינוזאורים ואח"כ עופות; זוחלים ואח"כ יונקים; יונקי יבשה ואח"כ יונקים ימיים וכו'). כאמור, סדר זה נשמר **בכל רחבי העולם**, וניתן להסיק על פי סדר זה - באיזו שכבה עלינו לחפש על מנת למצוא בעל חיים מסוים. (וראה מה שכתבתי לעיל בעניין הטיקטאליק).

האם יש הסבר חלופי לתופעה זו?

בעבר, היו מי שרצו לתלות ממצאים אלה במבול שהיה בימי נח. טענו שהדינוזאורים היו יצורי תערובת שיצרו בני דור המבול ולכן הם לא ניצלו בתיבה והושמדו יחד עם בני דור המבול.

למותר לציין שהדינוזאורים לא היו בני תערובת וכי מעולם לא שזפתם עין אדם, שכן הללו נכחדו עשרות מיליוני שנה לפני שהאדם עלה על הבמה. (אמנם, ברור שהאדם נתקל פעם בפעם בעצמותיהם של בעלי חיים אלה, מבלי לדעת הרבה על טיבם, והיתקלויות אלה עשויות להיות הבסיס לאגדות רבות העוסקות ביצורי ענק).

כמו כן, אין מדובר כאן רק בדינוזאורים, אלא במגוון רחב מאד של יצורים - ביניהם יצורים שהתקיימו מאות מיליוני שנים לפני הדינוזאורים, וביניהם כאלה שהתקיימו עשרות מיליוני שנים אחריהם. קשת רחבה של בעלי חיים וצמחים אשר את חלקם מופיעים לעינינו **ברבבותיהם ובתפוצה כלל עולמית**, והמתארים מצב של השתנות תמידית והדרגתית.

טענה "הגיונית" יותר שניתן היה לטעון הוא שהבורא ברא בכל פעם מחדש מגוון עצום של בעלי חיים וצמחים, ושב והכחיד אותם, ושוב ברא מגוון עצום של בעלי חיים **הדומים להם במעט**, ושב והכחידם, ושוב ברא בעלי חיים הדומים לקודמיהם במעט, ושב והכחידם, וחוזר חלילה.

דבר זה יכול להסתמך גם על מאמר חז"ל לפיו "היה הקב"ה בורא עולמות ומחריבן" (בראשית רבה, פרשת בראשית ג ועוד). אמנם מאמר זה יכול לבאר אירועים מסוימים שאירעו בעולמנו, שכן עולמנו ידע כמה אירועים של הכחדה כלל-עולמית בהם נמחו מן הארץ רבים מן היצורים שהיו חיים בה. הכחדות אלה מתועדות היטב בממצא המאובנים (ואין הכוונה למבול שאירע לפני 4,000 שנה. אירוע ההכחדה ההמוני הגדול האחרון אירע לפני 65 מיליון שנה, ובו נכחדו לפי ההערכה כ-50% מכלל המינים, ובכללם רוב הדינוזאורים. ההכחדה הגדולה ביותר הידועה היא זו שאירעה לפני 251 מיליון שנה, ובה נכחדו כ-95% מכלל המינים הימיים, וכ-70% מהמינים היבשתיים). אולם הכחדות אלה אינן מסבירות את ההשתנות ההדרגתית של המינים אשר מתרחשת בכל העת, **בין הכחדה להכחדה**. אם נתבונן ברצף בעלי החיים שמן הדינוזאור המנוצה - לעוף, או מן דמוי-הסוס הראשון לסוס בן ימינו, או מן בעל הפרסות היבשתי - ללוייתן, נתקשה לומר שהבורא ברא בעל חיים מסוים, השמיד אותו, וברא בעל חיים **שקצת דומה לו**, והשמיד אותו, ושוב ברא בעל חיים שקצת דומה לו ושוב השמידו וכו'. מה הטעם ומה הרקע לבריאות ולהשמדות הללו? האם לא הגיוני יותר לומר שהבורא ברא את בריותיו בצורה של התפתחות ושינוי מדור לדור? וכמו שבני האדם השתנו ונעשו שחורים וצהובים ולבנים, כחולי עיניים ושחורי עיניים, בעלי חמש אצבעות כף רגל ובעלי שתי אצבעות? האם גם כאן נסבור שהקב"ה ברא **מלכתחילה** אנשים שחורים וצהובים ובעלי שתי אצבעות או עיוורון צבעים?

יתר על כן, העובדה שאנו מוצאים בבעלי החיים של ימינו **שרידים מן העבר**, מראים שהיה להם "עבר". דוגמא לכך הם שרידי האצבעות המנוונים של הסוס, שאנו יכולים לעקוב אחריהם ולראות כיצד ברצף של עשרות מיליוני שנים הלכו האצבעות היתירות והתנוונו ונעלמו עד למצבו של הסוס בן ימינו.

ומכאן אנו עוברים באופן טבעי לסוג הראיות השני שיש לאבולוציה: ראיות שנובעות מאיבריהם של בעלי החיים העכשוויים.

ב. האבולוציה: מתועדת בבעלי החיים של ימינו

כפי שציינתי, איננו זקוקים לראיות שמן הממצאים המאובנים. בעלי החיים עצמם מצביעים בגופם על עברם ועל תהליך השינוי שהתחולל בהם. אחד מגופי הראיות לאבולוציה נובע מקיומם של איברים מנוונים, זאת אומרת, איברים שניכר שהם שימשו במקור לתפקיד אחר שאינו נצרך עוד בבעל החיים הנוכחי. בחלק מן המקרים האיבר משמש גם כיום את בעל החיים אבל למטרות שונות (דוגמא לכך: כנפי הפינגווין המשמשות לשחיה), ובחלק מן המקרים האיבר אינו משמש לדבר (דוגמא לכך: כנפי הקיווי). בפרק שלהלן נבחן אחדים מהדוגמות שהטבע מציע לנו.

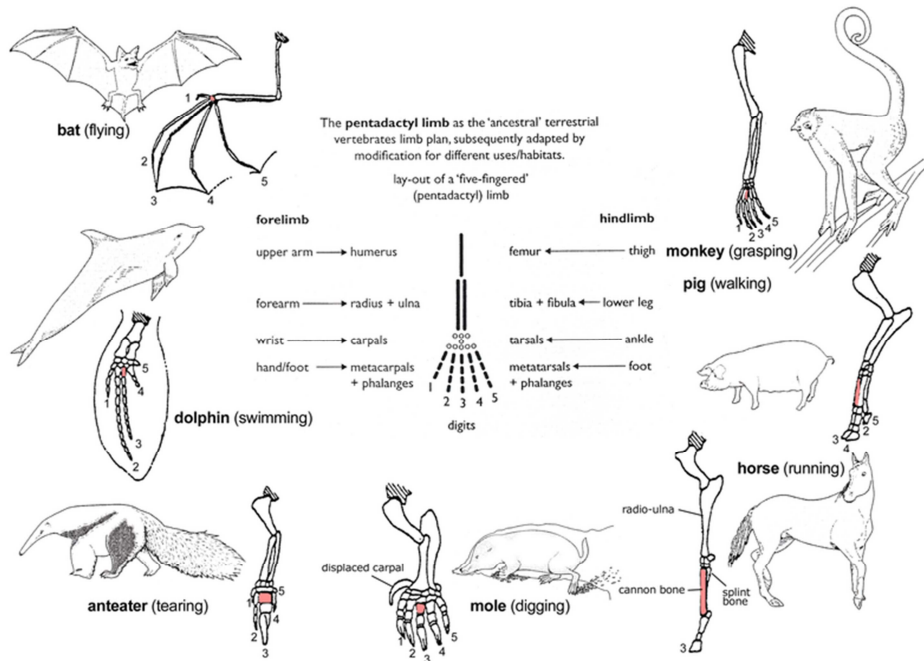
לתשומת לב, בכל המקרים בהם אנו נמצא איברים או מאפיינים מנוונים, יהיו אלו איברים ומאפיינים שהיו חלק מעברו הרחוק של בעל החיים. לעולם לא נמצא איברים מנוונים שאינם קשורים לעברו של בעל החיים. כך לדוגמא, לעולם לא נמצא סוס עם כנפיים מנוונות, לטאה עם בלוטות חלב מנוונות וכדומה. הממצאים שאנו מוצאים, כמו גם הממצאים שלעולם אין אנו מוצאים, מתאימים לעולם לראיית העולם האבולוציונית.

איברים "מנוונים"

1. גפיים

גפיים: יד, סנפיר, כנף - אחת התופעות המרתקות בנוגע לגפיים היא שאף כי המבנה החיצוני והתפקוד עשוי להיות שונה מאד בין בעל חיים אחד למשנהו, עדיין אנו עשויים למצוא "בפנים" אותה מתכונת בסיסית. בדוק את גפיהם של בעלי חיים שונים ותמצא בכולם **אותו המבנה הבסיסי** כולל חמשת האצבעות, כאשר מבנה זה מותאם בכל בעל חיים לצרכיו.

הראיות למוצא המינים באמצעות אבולוציה



גפיים קדמיות (© Jerry Crimson Mann 2005)

גפיים קדמיות המשקפות שימושים שונים ביונקים שונים: אחיזה (קוף), הליכה (חזיר), ריצה (סוס), חפירה (חפרפרת), עקירה (דב נמלים), שחייה (דולפין) ותעופה (עטלף). כל הסוגים הללו מבוססים על מבנה בסיסי אחד המאויר במרכז.

אלא שלפעמים בעל החיים אינו זקוק לחמשת אצבעותיו, ובחלק ממקרים אלה אנו נראה שלבים שונים באיבוד אצבעות: החל באצבעות מנוונות ובלתי שימושיות, המשך בשרידים של אצבעות וכלה באצבעות שנעלמו לחלוטין. לפעמים אנו מוצאים רצף של מאובנים מן העבר שמראה לנו את כל השלבים הללו (כמו במקרה של הסוס), אך גם אם לא נמצא רצף זה, כשאנו נתקלים בשרידים של אצבעות, ובאצבעות מנוונות, אנו יכולים להסיק מעצמנו שבעל חיים זה לא **נברא** עם אצבעות מנוונות ולא שימושיות, וכי אביו הקדום היה בעל אצבעות מפותחות

ורגילות "כמו כולם", ואצבעות אלה התנוונו במהלך הדורות היות ולא התאימו עוד לצרכיו של בעל החיים.⁷⁴

הבאתי לעיל דוגמא קיצונית למצב זה - רגליו האחוריות של הלויתן. בעוד שרגליו הקדמיות של הלויתן הפכו לסנפירים (שבתוכם יש, כצפוי, חמש אצבעות), רגליו האחוריות נמצאות בתוך גופו, ואינן משמשות לדבר. הן אינן מחוברות עוד לשדרה ואינן מתפקדות.

כולנו יודעים שלנחש היו רגליים, ובכן, לחלק מנחשי הפיתון נשארו עצמות אגן הירכיים, כשהן מנותקות מעמוד השדרה ואינן משמשות לדבר. בקרב נחשים אחרים נעלמו עצמות אגן הירכיים. בדומה לכך, לחלק מהלטאות יש רגליים סמויות המתחבאות מתחת לעור ואינן ניכרות מבחוץ.⁷⁵

2. כנפיים

כנפיים מנוונות הן גם כן תופעה שכל אחד מאיתנו מכיר. וכי מי לא מכיר את העופות משוללי כושר התעופה, המתהדרים עם זאת בכנפיים.

עופות אלה נחלקים לכמה סוגים: קבוצה אחת כוללת עופות גדולים וחזקים, שאינם מסוגלים לעוף מחמת גודלם, ואף אינם זקוקים לתעופה תודות למהירותם הרבה ויכולתם להגן על עצמם. עם אלה נמנים היען, האמו, הקזואר ודומיהם. קבוצה שנייה כוללת עופות שעברו "הסבה" לכישורים אחרים, כגון הפינגווינים אשר משתמשים בכנפיהם לצורך שחיה וצלילה כבסנפירים. קבוצה שלישית ומעניינת במיוחד כוללת עופות שאיבדו את כושר התעופה משום שהאזור שבו הם חיו היה מוגן מבעלי חיים טורפים והפך את התעופה למיותרת. עופות אלה הם עופות שהגיעו (בתעופה!) לאיים רחוקים, אשר יונקים לא הצליחו להגיע אליהם (מאחר שלא יכלו לעוף אליהם), ומשעה שהגיעו לאיים אלה, ו"התברר להם" שאין שם

74 לחלופין, אם לא היה צורך באצבעות, הרי שתקלות חוזרות ונשנות עשויות היו לגרום לאיבוד האצבעות, מבלי שמאבד האצבעות ייעלם מהאוכלוסיה בשל כך. במקרים קיצוניים, ייתכן שהאצבעות אכן נחוצות לבעל החיים, אלא שתקלה מקרית גרמה לו לאבד אותן, ובידוד מיתר האוכלוסיה קיבע את המצב הזה, כעין מה שקרה לבני שבט הואדומה.

75 ריינוד וקן, עיכוב התפתחותי.

בעלי חיים המאיימים על קיומם (כלומר יונקים טורפים), הם איבדו את את כושר התעופה שלהם.⁷⁶

אחד מהעופות המפורסמים הללו הוא הדודו, עוף שחי באי מאוריציוס ונכחד לפני כשלוש מאות שנה על ידי המתיישבים ההולנדים. עוף זה, שרגיל היה לחיים נטולי סכנה, לא זו בלבד שאיבד את כושר התעופה שלו אלא אף איבד את חוש הזהירות שלו ודבר זה הביא להכחדתו.

בחלק מהעופות הללו הכנפיים זעירות במיוחד. את כנפיו הזעירות של הקיווי (העוף הלאומי של ניו־זילנד) לא ניתן לראות מבעד למעטה הנוצות שלו, אולם עצמות הכנפיים נמצאות במקומן.

עוף מעניין אחר בקבוצה זו הוא התוכיליל (קאקאפו), שעליו אמר דגלס אדמס שלא זו בלבד שהוא שכח כיצד לעוף, אלא גם שכח שהוא שכח כיצד לעוף... עוף מעניין זה עלול לפעמים לטפס במהירות על עץ, לקפוץ למטה ולנחות כגוש חבוט על פני הקרקע, מאחר והוא באמת אינו יכול עוד לעוף, אלא שהוא ככל הנראה לא הפנים דיו את הרעיון.

שרידי הכנפיים של הקיווי, התוכיליל שחושב עדיין שהוא יודע לעוף למרות שאינו יכול עוד, ויתר העופות הללו שאיבדו את כושר התעופה שלהם - מורים על אבות קדמונים שהיו בעלי כנפיים מעופפות.

ואם כבר נגענו בנושא הכנפיים, אציין כמה עובדות מעולם החרקים. חוקרי החרקים טענו בעבר כי מקורה של הנמלה הוא בצרעה מעופפת ש"איבדה" את כנפיה. (ואכן, "מלכת" הנמלים וזכרי הנמלים מתהדרים בכנפיים). טענה "מפתיעה" זו זכתה לאישוש כאשר נמצא יצור הביניים *Sphecomyrma freyi* משומר בענבר בן 92 מיליון שנה. חרק זה משלב מאפיינים של צרעה ושל נמלה בגוף אחד.⁷⁷

נוסף על כך, ישנם סוגים רבים של חיפושיות שאינן מעופפות, אשר להם כנפיים מושלמות מתחת לכנפי החפיה המאוחות שלהם.⁷⁸

76 ומכאן מענה למי שחושק בכושרם של העופות לעופף. התעופה גובה מחיר יקר בהגבלת גודל בעל החיים ובאנרגיה המושקעת בתעופה. אם ניתן לוותר על התעופה ולעבור לחיים על פני היבשה, זה הדבר שקורה.

77 וילסון וחב', נמלה מהמזוזואיקון.

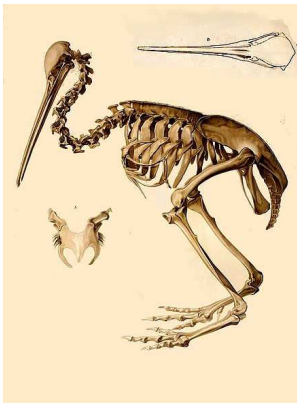
78 פוטווימה, ביולוגיה אבולוציונרית.



(© Reanimator86) *Sphecomyrma frey*



דודו (© Bazza Da Rambler, 2009)



שלד של קיווי



קיווי

גם מקומם של החרקים המוכרים לנו כל כך, הזבובים, לא נפקד: בניגוד לרוב החרקים שלהם ארבע כנפיים יש לזבובים רק שתיים בלבד (ומכאן שמה המדעי של סידרת הזבובאים: Diptera - "דוֹ-כנף"). זוג הכנפיים השני הצטמק לצמד "בוכניות" המתנועעות במהירות גבוהה ומסייעות ליציבותו של הזבוב. ומנין לנו שזוג הבוכניות הללו שימש בקרב אבות אבותיו של הזבוב ככנפיים? לזאת יש כמה ראיות: הן תופסות בדיוק את המקום שתופסות כנפי התעופה ונעות באותה תבנית כמו כנפי התעופה. התפתחותן העוברית זהה לזו של הכנפיים, והן אף נראות

(בייחוד בתהליך ההתפתחות) ככנפיים מצומקות וזעירות. יתרה על כן, יש זבובים מוטנטים שבהם לא התנהלה ההתפתחות העוברית כתקנה, והם אינם מצמיחים בוכניות אלא זוג נוסף של כנפיים כמו אצל יתר החרקים.⁷⁹

3. עיניים

העיניים הן ללא ספק כלי רב ערך לבעל החיים. ואכן, קיימות לפחות עשר גירסאות שונות של עיניים בעולם החי, וסבורים שהעיניים התפתחו בקרב עשרות מינים בנפרד.⁸⁰ עם זאת, בעלי חיים מסוימים אינם זקוקים עוד למאור עיניהם משום שהם חיים בסביבה חשוכה (מתחת לאדמה, במערה וכדומה). וכך ליצורי מערות, כמו הדג *Astyanax mexicanus*, וכמו הסלמנדרות *Typhlotriton spelaeus* ו-*Proteus anguinus* יש עיניים שאינן רואות.⁸¹ לדג האמור יש עדשה, רשתית מנוונת, עצב אופטי מנוון ולובן-עין, למרות שהוא עיוור. לסלמנדרות האמורות יש עיניים עם רשתית ועדשה, אלא שהעפעפיים מכסות אותן והן עיוורות. מצויים גם נחשים שעניהם מכוסות לגמרי בקשקשים, והחולד המפורסם שעניו מצויות מתחת לעורו. יצורים אלה, שזכו לשם מיוחד: "טרוגלוביטים", מונים גם חסילונים, סרטני נהרות, רבי רגליים, עכבישים, צרצרים ובעלי חיים רבים אחרים.⁸²

4. תוספתן

מן הראוי להזכיר גם כן איבר מעניין זה. התוספתן הוא איבר חיוני בקרב בעלי חיים אוכלי העשב. בקרב בעלי חיים אלה התוספתן גדול ומפותח, ומשמש כאיבר התססה לצורך פירוק התאית שבעלי חיים אלה צורכים. ככל שבעל החיים צורך פחות תאית, כן קטן התוספתן שלו. באדם, שאינו צורך עלים ואינו מעכל תאית, התוספתן כמעט שאינו קיים. התוספתן נחשב אפוא כשריד שנשאר מאבות קדמונים צורכי-תאית. בעבר חשבו שהתוספתן מיותר לחלוטין ואינו מביא כל

79 דוקינס, ההצגה הגדולה בתבל, עמ' 333.

80 לנד ופרנהולד, אבולוציה של העיניים.

81 ביירס וברנדון, השפעת האור; קלר וחב', עין מנוונת; ג'פרי, דג המערות; קוס וחב', סלמנדרת מערות.

82 דוקינס, ההצגה הגדולה בתבל, עמ' 338; קוין, למה האבולוציה נכונה, עמ' 113-114.

תועלת, ואילו כיום סבורים שבמקרים מסוימים התוספתן עשוי לשמש עדיין את האדם ולסייע למערכת החיסונית.

אולם, מתברר שתועלתו זו היא משנית, וכי הנזק שהתוספתן גורם גדול לאין שיעור מהתועלת המסוימת שהוא עשוי להביא. התוספתן המצומק של האדם הוא מקור לא אכזב לדלקות. אחד מכל חמשה עשר אנשים ילקה במשך חייו בדלקת התוספתן. דלקת זו מטופלת כיום באמצעים כירורגיים, וברוב המוחלט של המקרים, האדם ניצל. אולם בעבר הלא־רחוק, כאשר לא היה עדיין פתרון רפואי מניח את הדעת, היה התוספתן המודלק גובה את חייהם של למעלה מעשרים אחוז מהחולים! במלים אחרות, קיומו של התוספתן בגוף האדם הביא למוות של למעלה מאחוז אחד מהאוכלוסיה. וזה הרבה יותר מהתועלת המשוערת שהתוספתן עשוי לגרום לה. מה שמראה בצורה ברורה שאיבר זה לא תוכנן בהתאם לגופנו ולטובתנו, אלא הוא שריד מזיק ש"נתקענו" איתו.⁸³

שאלה לעיון:

אם אכן כך הוא הדבר, מדוע נתקענו עם שריד זה, והוא לא "נעלם" מגופנו? הרי לפי הדברים הללו יש יתרון הישרדותי לאנשים שאין להם תוספתן על פני אנשים שיש להם תוספתן?

אציג שתיים מהתשובות האפשריות:

- א. כל תהליך לוקח זמן. ייתכן שלו חיכינו עוד, אזי בעתיד הרחוק היינו מוצאים שהאנשים ששרדו הם אנשים שאין להם תוספתן. אמנם, נכון לעכשו, תהליך זה נעצר ככל הנראה ואינו נמשך, שהרי הטיפול הרפואי ביטל את היתרון ההישרדותי של חסרי־התוספתן על פני בעלי־התוספתן.
- ב. ייתכן שהתוספתן הגיע לנקודת אל־מוצא. התהליך אותו היינו מבקשים לראות הוא תהליך בו התוספתן ממשיך ונעשה קטן יותר ויותר עד שהוא ייעלם. אמנם, היות ותוספתן קטן יותר משמעו סיכון רב יותר לפיתוח דלקת התוספתן ייתכן שהגענו לדרך "ללא מוצא", בה עדיף היה לנו להיות נטולי תוספתן (ואנשים נטולי תוספתן היו ללא ספק שורדים טוב

83 קוין, למה האבולוציה נכונה, עמ' 115-117.

יותר מאנשים בעלי תוספתן, כפי שציינתי), אולם הדרך להשגת יעד זה - על ידי הקטנה הולכת וגוברת של התוספתן - חסומה בפנינו, משום שבעלי התוספתן הקטן יותר - ישרדו **פחות** מבעלי התוספתן הרגיל. כך שאיננו יכולים "לדלג" ולהגיע למצב הרצוי של העדר־תוספתן.

ומאחר ועסקתי באיבר אנושי, אזכיר בכמה מילים עוד שתי תכונות שהאדם נושא עמו כזכר לעברו:

5. "עור ברווז"

כולנו מכירים את תחושת "עור הברווז" שאנו חווים כאשר קר לנו, או כשמבהילים אותנו. תחושה זו נגרמת על ידי השרירים הזעירים המחוברים לשורשי שערות גופנו. לשם מה אנו זקוקים לשרירים זעירים אלה, ולשם מה אנו זקוקים ל"עור ברווז" כאשר קר לנו או כשאנו מבוהלים?

ובכן, איננו צריכים. אבל אבות אבותינו היו צריכים. בעלי פרווה עושים שימוש חשוב בתופעה זו שגורמת לפרוותם לסמור. לפרווה הסמורה יש כמה שימושים: היא מבודדת טוב יותר בעת קרה, ובנוסף לכך כשבעל החיים מבוהל - כלומר, מאוים על ידי בעל חיים אחר - הפרווה הסמורה שלו מקנה לו מראה גדול בהרבה, שעשוי להרתיע את האויב. אנו איבדנו את כסות השיער הצפופה שלגופנו (שכזכור, צומחת על גופנו במהלך התפתחותנו כעובר, אבל נושרת מגופנו לפני הלידה), ונשארו עם עור הברווז והשרירים הזעירים המיותרים.

6. שרירי האוזניים

דוגמא נוספת של שריד מהעבר הם שלושת שרירי האוזניים המאפשרות לחלק מן האנשים להניע את אזניהם. שרירים אלה משמשים בעלי חיים רבים להזזת אזניהם לצורך איתור מקורות רעש. הזזת האוזניים מאפשרת להם לאתר טורפים או את צאצאיהם. בקרב בני אדם, גם אצל אלו שמסוגלים להזיז את אזניהם, אין לשרירים אלה כל שימוש.

ג. פסאודוגנים

לצד האיברים המנוונים אותם אנו עשויים למצוא בבעלי חיים, אנו עשויים למצוא גם גנים מנוונים/"מתים", הנקראים גם "פסאודוגנים". הכוונה לגנים שביצעו בעבר פעולה מסוימת, וכיום אינם פעילים עוד. גנים אלה עדיין קיימים במטען הגנטי כעדות אילמת לתפקיד בו הם שימשו בעבר.

קריאת המטען הגנטי מאפשרת לנו כיום לאתר ולבודד רצף גנטי המשמש כגן האחראי על פעילות מסוימת. השוואת רצפים גנטיים בין בעלי חיים שונים מאפשרת לנו לאתר את הרצף המדובר גם בבעלי חיים אחרים. כאשר אנו מוצאים רצף דומה בבעל חיים אחר ורואים שבו הוא אינו מחולל דבר, אזי איתרנו גן מושקע (פסאודוגן).

למציאת הגן המושקע יש כמה משמעותות. קודם כול, הוא מהווה עדות לעברו השונה של בעל החיים. עבר בו הוא נזקק ככל הנראה לשימושיו של הגן הזה. נוסף לכך, הגן המושקע מסייע לנו גם בקביעת קרבה בין מינים שונים, כאשר העובדה שבעלי חיים שונים חולקים ביניהם אותו רצף גנטי, גם אם הוא פעיל אצל האחד ומושקע אצל האחר, מצביעה על עבר משותף - על אב משותף שהוריש לשניהם את הגן הזה. יתר על כן, כאשר אנו מוצאים כמה בעלי חיים שבכולם מושקע אותו הגן, אזי אם אופן ההשתקה זהה ונובע מאותה מוטציה / תקלה ברצף, זה עשוי להורות לנו על קרבתם המשוערת של בעלי חיים אלה, ולמסקנה שהתקלה המדויקת הזו אירעה באביהם המשותף של שני המינים הללו.

פסאודוגנים אינם דבר נדיר. ניתן לומר שכל מין עלי אדמות נושא בחובו פסאודוגנים שעדיין פעילים בקרב בעלי חיים אחרים, שארי בשרו. אנו, בני האדם, נושאים במטען הגנטי שלנו כאלפיים פסאודוגנים, כעשירית מכלל הגנים שיש לנו.

להלן כמה דוגמות לפסאודוגנים:

1. ויטמין סי

האדם אינו מסוגל ליצור בעצמו את החומצה האסקורבית (ויטמין סי). בחוסר יכולת זו שותפים לו הפרימטים,⁸⁴ עטלפי הפירות והקביה, כל אלה בעלי חיים

84 הפרימטים הם סדרת יונקים הכוללת את הקופים, הקופיפים וקופי האדם (למעלה ממאתיים מינים שונים).

שמזונם עשיר בויטמין סי והם אינם זקוקים לייצר אותו בעצמם. היות וכל יתר היונקים מסוגלים לייצר ויטמין סי בעצמם, הנחת היסוד היתה שגם אבות אבותיהם של בעלי חיים אלה יכלו ליצור ויטמין זה, וכי יכולת זו התנוונה משום שלא היה בה צורך, ואכן המחקר הוכיח טענה זו. מסתבר שיצירת ויטמין סי היא תהליך המורכב מארבעה שלבים שכל אחד מהם "נשלט" על ידי גן אחר. לפרימטים ולקביות יש עדיין את הגנים להפעלת שלושת השלבים הראשונים של התהליך והם "נתקעים" בשלב האחרון, שכן הגן האחראי על השלב האחרון עבר מוטציה ואינו מתפקד עוד (גן זה מכונה ψGLO). אמנם, האופן בו מושבת הגן הרביעי הזה בקרב פרימטים **שונה** מהאופן בו הוא מושבת בקרב הקביות. מתברר שבקרב כל הפרימטים, כולל האדם, הגן הרביעי אינו מתפקד בגלל בסיס יחידי מסוים שנעדר ברצף הגנטי של גן זה.⁸⁵

כאמור, הרצף של ψGLO בקרב הפרימטים אינו תקין. אמנם, גם בו טמונות עוד פיסות של מידע, מכיון שהרצף משקף את מידת הקרבה של המינים זה לזה. וכך לדוגמא מידת הדמיון ברצף של גן זה בין הגירסא האנושית לבין הגירסא השימפנזית, גדולה ממידת הדמיון שיש בין שתי גירסאות אלה לבין הגירסא המקבילה של האורנג'אוטן. מובן מאליו שהרצף של הקביות שונה בהרבה ומשקף מוטציה שאירעה באופן עצמאי מהמוטציה שאירעה אצל הפרימטים.

☞ שאלה: מדוע תקלה זו לא אירעה ביתר בעלי החיים? תשובה: ייתכן ואף מסתבר שהיא אירעה, אלא שכאשר היא אירעה אצל בעל חיים אחר, שמזונו אינו עשיר בויטמין סי כמו בעלי החיים הניזונים על פירות, הוא שילם על כך בחייו ולא העביר את התקלה הזו לדור הבא, ואין צורך לומר שהתקלה לא הפכה להיות שכיחה בקרב בני מינו.

2. קולטני ריח

חלק ניכר מקולטני הריח של האדם לא פעילים. לפי נימורה⁸⁶ יש באדם ככל הנראה 802 גנים האחראיים על קולטני ריח, כאשר למעלה ממחציתם (414 ליתר דיוק) אינם מתפקדים ונחשבים כפסאודוגנים. לשם השוואה, לעכברים יש כ-1400 גנים

85 קוין, למה האבולוציה נכונה, עמ' 125-127.

86 נימורה, אבולוציה של קולטני ריח.

האחראים על קולטני ריח, ורק 25% מתוכם אינו מתפקד.⁸⁷ החוש המפותח במיוחד אצל האדם הוא חוש הראיה, ושיבושים ביצירת קולטני הריח שלו אינם משפיעים על יכולת ההישרדות של הפרט כשם שהם משפיעים על יכולת ההישרדות של העכבר.

ציינתי לעיל שבקרב הלווייתנים המצב "גרוע" יותר, מאחר והשימוש בו הם יכולים לעשות בקולטני הריח שלהם מוגבל עוד יותר, מאחר וקולטני הריח שלהם מותאמים להרחת באויר ולא להרחת בתוך המים. שיעור הפסאודוגנים בקרבם נע בין 60%-80% (תלוי בסוג הלווייתן).⁸⁸ אצל הדולפינים המצב "חמור" עוד יותר: יש להם גנים רבים לקולטני ריח, אולם אף אחד מהם אינו מתפקד.⁸⁹

3. ביצים

לפי האבולוציה, מוצא היונקים בזוחלים מטילי הביצים. זאת אומרת שאמות אמותיהם של היונקים הטילו ביצים ובקעו מביצים. יונקי הביב, סדרה בת חמשה מינים בלבד ששרדה באזור אוסטרליה, יכולה להחשב כמעין "חוליית ביניים" - יונק שעדיין מטיל ביצים.

עבר זה מתועד אף הוא במטען הגנטי שלנו.

הזוחלים והעופות, מטילי הביצים, מספקים לעובר שקיק חלמון העשיר בחלבון המזין ויטלוגנין. גם היונקים נושאים בחובם את שלושת הגנים האחראים ליצירת חלבון זה, אלא שהם מושבתים, מאחר והיונקים אינם מזינים עוד את עובריהם באמצעות שקיק חלמון אלא ישירות באמצעות השליה. יתר על כן, היונקים עדיין מייצרים את שקיק החלמון אלא שהוא מנוון וריק מחלמון ובמהלך החודש השני להריון הוא מתנתק מהעובר.

ד. אטביזם

נושא הקשור הדוקות לאיברים המנוונים הוא האטביזם: **הופעה מחדש** של תכונה שאינה קיימת עוד באבותיו ואבות אבותיו של בעל החיים.

87 נימורה, ניתוח משווה של קולטני ריח.

88 קישידה וחב', קולטני ריח בבעלי חיים ימיים.

89 פרייטג וחב', קולטנים.

דוגמא לכך: הופעת רגליים אחוריות בלוייתנים ודולפינים. דוגמות נוספות להלן.

ההסבר שעומד מאחורי תופעה זו הוא שתכונה מסוימת שהיתה מנת חלקו של בעל חיים קדום, ואשר נעלמה במרוצת הדורות מצאצאיו, עשויה להישמר עדיין במטען הגנטי של צאצאיו כתכונה רדומה/מושקת. כלומר, ההוראה העתיקה עדיין קיימת, אלא שקיים מנגנון המשתיק את הביטוי שלה בפועל. לפעמים חל שיבוש (מוטציה) במנגנון המשתיק את הופעתה של התכונה ההיא, והתוצאה היא שבעל החיים שבו אירעה המוטציה - שב ומגלה את התכונה הזו שבה התהדרו אבותיו הקדומים, בשונה מיתר בני דורו.

כמו בנוגע לאיברים המנוונים, לא ייתכן אטביזם בתכונה שלא היתה מצויה בעברו הקדום של היצור. ולדוגמא, תופעת האטביזם לעולם לא תייצר סוס המגדל כנפיים, שכן אף אחד מאבותיו של הסוס לא הצמיח כנפיים, וזו לא תכונה שקיימת במטען הגנטי שלו. באופן זה מסייע לנו האטביזם לדעת מה טמון בעברו של בעל החיים.

דוגמות של אטביזם שמתרחשים לעתים: הופעת בהונות עודפים ברגל הסוס (אצבעות 2 ו-4, בדומה למצב שנמצא בקרב אבותיו הקדומים (*Mesohippus*) ו-*Merychippus*); הופעת בהונות נוספים ברגלי קביות וסלמנדרות; הופעת כנפיים בקרב צבתנים (חרקים נטולי כנפיים)⁹⁰, ולעיל הזכרתי את העופות שהצמיחו שיניים.

אמנם, כמדומה שהדוגמא הדרמטית ביותר היא הופעת רגליים אחוריות בקרב לווייתנים. קיימות דוגמות רבות של לווייתנים (ודולפינים) מסוגים שונים שהיו להם רגליים אחוריות הכוללות את עצמות הירך, השוקה והשוקית. עם זאת, בחלק מהמקרים נמצאו ללווייתן גם כף רגל (אחורית) עם אצבעות.⁹¹ תופעה זו אינה מפתיעה לאור ההבנה שהלווייתן, כיונק, מוצאו מיונקים יבשתיים הולכי על ארבע, כפי שראינו לעיל.

90 הול, אטביזם.

91 ברזין, לווייתן הזרע.



דולפין עם גפיים אחוריות (© Taiji Whale Museum 2006)

אטביזם בבני אדם

גם על בני האדם לא פוסחת תופעה זו. למעלה ממאה מקרים של זנב אנושי דווחו בפרוטרוט בספרות הרפואית. בפחות משליש ממקרים אלה לא מדובר בזנב אמיתי, אלא ב"תקלות" מסוימות שאירעו במקרה באיזור הזנב. עם זאת, ברוב המקרים מדובר בזנב של ממש: כולל שכבת שומן, רקמות חיבור, שרירים, כלי דם, עצבים, גנגליונים וגופיפי פצ'יני (גופיפי חישה לתחושות לחץ). הזנב מכוסה בעור, שופע בזיקי שיער ובלוטות זיעה ובלוטות חלב.⁹² אורך הזנב נע בין סנטימטרים אחדים לתריסר ס"מ (בתינוק בן יומו!), וניתן להזיזו באופן רצוני בתגובה למצבים רגשיים שונים.⁹³ בזנב עצמו נמצאות לפעמים חוליות מפותחות (עד חמש חוליות),⁹⁴ אמנם חוליות אינן מרכיב הכרחי בזנב היונקים, ולדוגמא, הקוף *M. sylvanus* מתהדר בזנב חסר חוליות.⁹⁵ בדרך כלל הזנב הזה אינו עובר בתורשה,

92 דאו ונטסקי, זנב אדם.

93 ברוכין וחב', זנב אדם.

94 בר-מאור וחב', זנב אדם; סוגומאטה וחב', זנב אדם.

95 היל, פרימטים, עמ' 616.

אולם ידועים מקרים בהם הוא עבר בתורשה. במקרה אחד הוא עבר הלאה לפחות לשני דורות של נקיבות.⁹⁶

הגן האחראי להצמחת זנב בקרב עכברים וחולייתנים אחרים זוהה, וכצפוי הוא התגלה גם במטען הגנטי של האדם.⁹⁷ כמו כן זוהה תהליך הגורם לעיכוב צמיחת הזנב בקרב עכבר מוטנטי,⁹⁸ ומסתבר שתהליך דומה מעורב בעיכוב הצמחת הזנב האנושי.

נושא הזנב האנושי גורם למבוכה בקרב המתנגדים לאבולוציה, והללו טוענים שלא מדובר בזנב אמיתי, אלא שתשובה זו נכונה לגבי פחות משליש מהמקרים המתועדים. ברוב המקרים מדובר אכן בזנב אמיתי המתפקד כזנב לכל דבר. ומעניין לציין בהקשר זה את דבריו המפתיעים של רבי יהודה: "ויהי האדם לנפש חיה - מלמד שעשה לו עוקץ (=זנב) כחיה, חזר והעבירו ממנו מפני כבודו" (בראשית רבה, בראשית פ' י"ד ד"ה ויהי).

לצד האיברים המנוונים שנמצאים בכולנו, והאיברים האטביסטיים המופיעים לפרקים אצל ברי/בישי-המזל, ההיסטוריה של ההתפתחות מתועדת בכל אחד מאיתנו במהלך ההתפתחות העוברית, ועל כך להלן:

ה. אמבריולוגיה: ההתפתחות העוברית

האמבריולוגיה (הלא היא המדע העוסק בחקר העובר והתפתחותו) מספקת לנו ממצאים מרתקים ומפתיעים.

כזכור, לפי תפיסת האבולוציה בעלי החיים הקיימים כיום לא היו כך מאז ומעולם אלא התפתחו מצורות שקדמו להם. היונקים התפתחו מזוחלים, העופות - מדינוזאורים שהתפתחו בתורם מזוחלים, ואלו ואלו התפתחו מדגים.

למרבה הפלא, ה"היסטוריה" הזו של התפתחות בעלי החיים מונצחת בתהליך ההתפתחות העוברית שלהם.

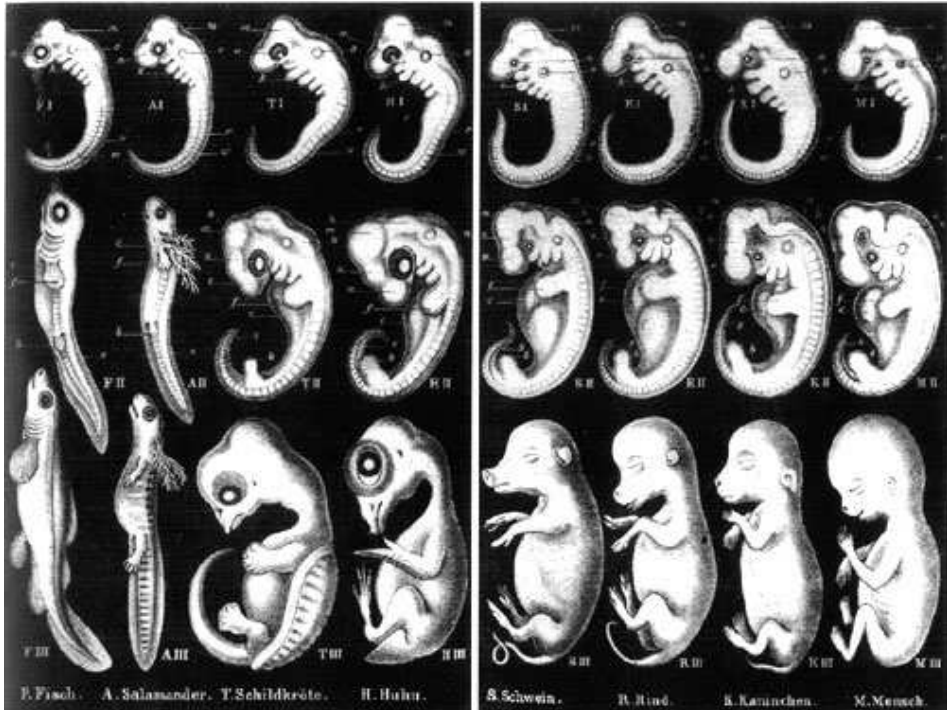
כבר במאה הי"ט הבחינו כי בשלבים הראשונים של ההתפתחות העוברית כמעט שאין להבחין בין עוברים של בעלי חיים שונים ולו גם רחוקים מאד זה מזה. האמבריולוג הדגול פון-בר (von Baer), כותב לדרוין על מקרה שקרה לו: ברשותו

96 סטנדרסט, זנב אדם.

97 קאטו, עכברים.

98 גרקו וחב', זנב.

היו שני עוברים משומרים בכהל, שאת זהותם הוא לא ציין לעצמו בעוד מועד, וכעת אין בידו לדעת אם מדובר בעוברים של לטאות, של עופות או של יונקים. כה רב הדמיון בתצורת הראש והגו של עוברים אלה.⁹⁹



התפתחות עוברית

איור מהספר *Anthropogenie* (1874) מאת ארנסט הקל (Ernst Haeckel)

באיור זה ממחיש המחבר את הדמיון בהתפתחות העוברית של שמונה חולייתנים: אדם, ארנבת, פרה, חזיר, תרנגולת, צב, סלמנדרה ודג (מימין לשמאל). שלוש השורות מייצגות שלושה שלבים בהתפתחותו של העובר. האיורים (שאיורו לפני כמה וארבעים שנה) אינם נחשבים כיום למדויקים דיים, אולם רב כוחם להמחיש את הדמיון המופלג בין המינים השונים.

99 קוין, למה האבולוציה נכונה, עמ' 134.

מתברר אפוא שבשלבים הראשונים של התפתחות העובר בעלי החיים מתפתחים בצורה דומה ולפי אותם העקרונות. כיום ניתן "לסמן" את התאים השונים בשלבים הראשונים של ההתפתחות ולראות אחרי כן איזה איבר ואיזה מבנה בדיוק מתפתחים מאלו תאים. ניתן כמו כן לבדוק אלו קבוצות של גנים מפקחות על אלו תהליכים בבניית הגוף (ומסתבר שאותן קבוצות של גנים פעילות במינים השונים). אחת השיטות הנהוגות במחקר כיום היא הכנסת שינויים בקבוצות גנים שונות, או העברת תאים בעובר המתפתח ממקום אחד למשנהו, ובשלבים שונים של התפתחות (או העברת תאים ממין אחד של בעל חיים למין אחר!), תוך הפקת תוצאות מעניינות ביותר (יצירת איברים כפולים ברמות שונות של התפתחות וכדומה).

הטכניקות הללו המשמשות את מדע האמבריולוגיה מאפשרות לנו לראות כיצד מנגנון מסוים שמשמש במין מסוים של בעל חיים למטרה מסוימת וליצירת איבר מסוים, הוא אותו המנגנון עצמו המשמש במין אחר של בעל חיים למטרה שונה וליצירת איבר שונה, כפי שאכן טוענת האבולוציה.

מדע זה מאפשר לנו גם להבין תופעות "מוזרות" בגופנו, שאינן מובנות לאשורן אם לא יודעים את ההיסטוריה של התפתחות הגוף שלנו, בחינת "דע מאין באת", ודוגמות לכך, להלן:

1. עצב בית הקול החוזר

אחת הדוגמות הבולטות להיסטוריה הארוכה של התפתחות גופנו הוא רשת העצבים המעצבבת את פנינו. שנים עשר זוגות עצבים יוצאים מהגולגולת ומעצבבים אזורים שונים בפנינו. רובם מתחברים ישירות לאיבר המטרה: עצב הריח, עצב הראייה, עצב השמע ועוד. עם זאת, חלקם עושה דרך פתלתלה וארוכה עד אשר הוא מגיע ליעדו, במקום "לבחור" את הדרך הישירה והקצרה. וחלקם מתפצל ומסתעף ומתחבר לכמה מטרות שונות וגורם בכך לכאבי ראש ניכרים בקרב סטודנטים לרפואה.

העצב המשולש, לדוגמא, הוא עצב שמתחבר לשרירים המשתתפים בלעיסה וגם לשרירים זעירים שנמצאים בתוך האוזן, וכמו כן הוא מעביר מידע תחושי מעור הפנים ומשורשי השיניים. בו בזמן מחובר עצב הפנים לשרירים הרבים

שמרכיבים את פנינו ואחראי בין השאר למגוון הבעות הפנים שלנו. עצבים אלה מתחברים לאזורים הסמוכים מאד זה לזה וחולפים זה על פניו של זה במסלולים מפותלים וכמעט חופפים, במקום שכל עצב יהיה מחובר לאזור משלו וימלא תפקיד מוגדר אחד כדרכם של יתר העצבים.

אולם עצב שמתנהג בצורה "מוזרה" בהרבה הוא העצב שזכה לשם הקולע "העצב התועה" (העשירי מבין שנים עשר עצבי הגולגולת). לעצב זה יש כמה שלוחות המעצבבות איברים חשובים בגוף. אותנו מעניינות כרגע שתי שלוחות העוברות ומגיעות לכל אחד מצדדיו של בית־הקול: עצב בית הקול החוזר (recurrent laryngeal nerve). לכל אחד מצדדי בית־הקול מגיעה שלוחה אחת של עצב בדרך הישירה ואילו השלוחה האחרת המגיעה לאותו צד עושה "סיבוב" חסר פשר: העצב צולל אל תוך בית החזה (!), מתקפל סביב אחד מהעורקים הראשיים היוצאים מהלב ושב ועולה לצואר במקום להתחבר במישרין לבית־הקול. הסיבוב הזה מאריך אותו בערך פי שלושה מהנחון.¹⁰⁰

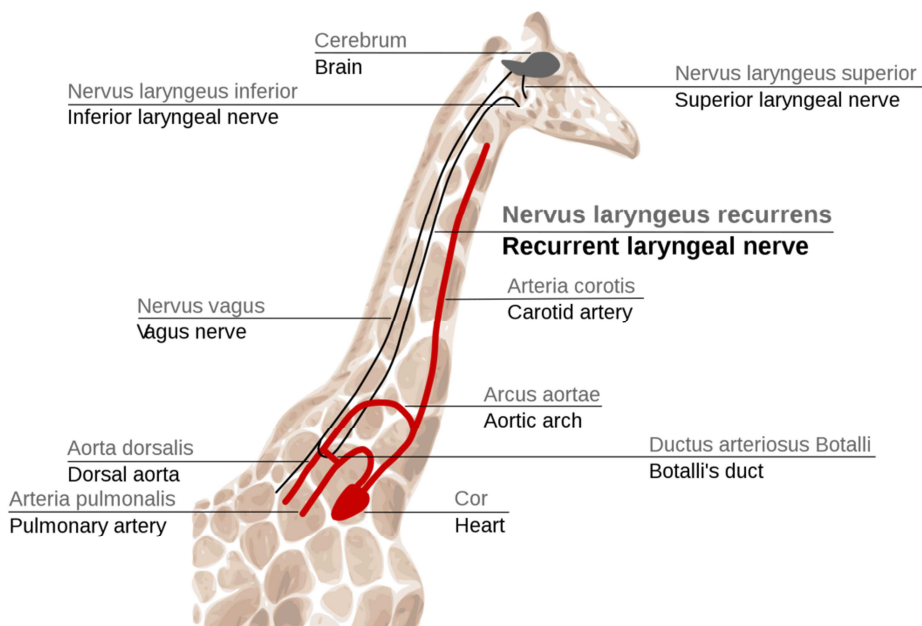
אם תופעה זו מוזרה כשהיא באה לידי ביטוי באדם, הרי שכאשר מדובר בבעל חיים ארך־צוואר, כמו הג'ירף, התוצאה מתמיהה בהרבה. עצב בית הקול - במקום שיהיה מחובר ישירות בין מוח הג'ירף לבין בית הקול של הג'ירף (מרחק סנטימטרים ספורים), חולף סמוך לבית הקול, יורד לכל אורך צוארו של הג'ירף, מתפתל ועולה שוב במעלה הצואר כולו, עד שהוא מגיע ומתחבר לבית הקול. אורכו של מעקף זה עשוי להגיע לחמשה מטרים!¹⁰¹ מה פשר הטיולים התועים הללו של עצב בית הקול החוזר?

ובכן, מסתבר שהתשובה נמצאת בהתפתחות העוברית ובהיסטוריה של העצבים הללו בעת העתיקה, כאשר "העניינים" היו הרבה פחות מסובכים.

100 קוין, למה האבולוציה נכונה, עמ' 147-149. לסרטון המתאר ניתוח עצב בית הקול החוזר בג'ירף, ראה: סאיינס בלוג, עצב בית הקול של ג'ירף.

101 דוקינס, ההצגה הגדולה בתבל, עמ' 346-350.

הראיות למוצא המינים באמצעות אבולוציה



עצב בית הקול החוזר בג'ירף (© Vladimir V. Medeyko 2010)

שלוחה אחת של העצב (הקו השחור הקצרצר שבאיור) יוצאת ממוח הג'ירף (הכתם האפור באיור) ומסתיימת בלסת. השלוחה השנייה (הקו השחור הארוך) יוצאת אף היא מהמוח, יורדת לכל אורך הצוואר, עולה בחזרה, ורק אז מתחברת ללסת, כעבור טיול מיותר בן חמשה מטרים.

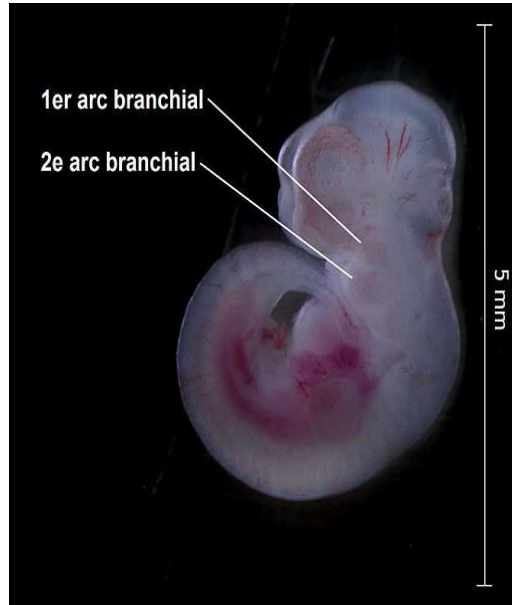
על מנת להבין את מצבם המתוסבך של העצבים שלנו כיום, איננו צריכים אלא לחזור למצב הראשוני, לבעלי החיים הראשונים שאצלם מופיע המבנה הבסיסי הזה: הדגים. במהלך התפתחותו העוברית של הדג, מופיעות באזור ראשו ארבע תפיחות המכונות "קשתות הזימים". כל אחת מהקשתות הללו תתפתח לעצבים, כלי דם, שרירים ועצמות (או סחוס - בדגי סחוס), ואילו השקעים שבין תפיחות אלו יהפכו לזימים. בדגים, הקשת הראשונה בונה את הלסת ואילו יתר הקשתות הופכים לעצבים השולטים בתנועת הזימים, לכלי דם ולעצמות התומכות בזימים. גם החוליות האחרים שאינם בעלי זימים מתחילים מאותה הנקודה, עם ארבע תפיחות באזור שיהיה הגרון (אצל האדם הן מופיעות בשבוע השלישי להפריה

ואילך).¹⁰² באמצעות סימון התאים שיש בכל תפיחה ותפיחה, ניתן לגלות אלו מבנים נוצרים בסופו של דבר מהתאים שבכל תפיחה. וכך אנו מגלים כי הקשת הראשונה יוצרת את שתי הלסתות, שתיים מעצמות האוזן (הפטיש והסדן) ואת כלי הדם והשרירים המגיעים אליהם. מהקשת השנייה נוצרת עצם האוזן השלישית (הארכוף), עצם קטנה הנמצאת בגרון ורוב השרירים האחראים להבעות הפנים. מהקשת השלישית נוצרים עצמות ושרירים הנמצאים בעומק הגרון והמשמשים אותנו בבליעה, ואילו מהקשת הרביעית נוצרים חלקים עמוקים יותר של הגרון, כולל בית הקול והשרירים וכלי הדם המשרתים אותו.

העצבים השונים המעצבבים את המבנים השונים נוצרים גם הם באותן קשתות שבהן נוצרים המבנים המעוצבבים על ידם.

אם נתבונן במה שקורה אצל הדג, נגלה כי העצבים המקבילים לעצב המשולש או לעצב התועה (ולעצב בית הקול החוזר, שהוא שלוחה שלו) מחוברים בצורה ישירה לזימים אותם הם מעצבבים. לנו, וליתר היונקים, אין זימים. במקום הזימים הולכים ומתפתחים מבנים שונים. כאמור, מהקשת הרביעית נוצרים אזורים שנמצאים בעומק הגרון ובית הקול על שריריהם וכלי הדם שלהם. העצבים שהעצבבים את הזימים המקוריים, הם אלה שמעצבבים כעת את המבנים הללו שתפסו את מקומם של הזימים. מצד שני, נוצרו מקשת זו גם מבנים הקשורים לאבי העורקים ולכלי הדם של הריאות, העצב התועה "נאלץ" להרחיק ולנדוד ביחד עם איברים אלה שהתפתחו אף הם מאותו האזור, וכך, גם השלוחות שלו המחוברות לבית הקול, עושות את "כל הסיבוב" ביחד עם יתר המבנים שהתפתחו מקשת זו. במקרה של הג'ירף, טיול זה הפך להיות ארוך יותר ויותר ככל שצוארו של הג'ירף הלך והתארך.

102 שובין, הדג שבתוכנו, עמ' 111.



קשתות זימים

שתי קשתות זימים בעובר עכבר בן 12.5 יום

2. מחזור הדם

תופעה מרתקת נוספת בהתפתחות העוברית היא התפתחות מחזור הדם. מסתבר שבקרוב היונקים מערכת כלי הדם של העובר עוברת מסלול פתלתול עד שהיא מגיעה למצבה המוגמר. במסלול זה, מערכת כלי הדם של היונק מתחילה מאותה נקודת מוצא של עובר הדג. אחרי כן מתחוללים שינויים במערכת זו והיא משקפת את מצב כלי הדם המתאים לעובר של דוחיים. אחרי כן מתחוללים שינויים נוספים וכלי הדם משקפים את המצב של עובר הזוחלים. ולבסוף מתבצעים שינויים נוספים והמערכת המתקבלת בסוף היא מערכת כלי הדם של היונק.¹⁰³

103 קוין, למה האבולוציה נכונה, עמ' 136-138.

3. עצמות האוזן

מה עוד מלמדת אותנו האמבריולוגיה?

אחד המאפיינים המבדילים בין יונקים לבין זוחלים ועופות הוא מבנה עצמות האוזן. חוש השמע של היונקים מפותח יותר, וזאת בזכות מבנה משוכלל יותר של האוזן התיכונה שלהם. בעוד שלזוחלים ולעופות יש עצם אחת באוזנם (הארכוף), מתהדרים היונקים בשלוש עצמות (ארכוף, פטיש וסדן).

לפי האבולוציה, התפתחו היונקים מהזוחלים. מאין להם אפוא העצמות היתרות הללו? אין זו קושיא של ממש, שכן שינויים קלים בתפקודם של הגנים עשויים לגרום להכפלה של מערכות שלמות של עצמות ואיברים. אולם התשובה היא אלגנטית יותר: שתי העצמות היתירות שבעצמות האוזן של היונקים קיימות אצל הזוחלים והעופות, אלא שאצלם הן חלק מעצמות הלסת. האמבריולוגיה מראה כיצד אותן עצמות ממש "נדדו" אצל היונקים ממקומם והפכו לעצמות האוזן התיכונה.¹⁰⁴

אם אמת בטענה, שעצמות האוזן התיכונה של היונקים היו במקורן עצמות לסת. האם לא נצפה למצוא יצורי ביניים, בהם עצמות אלה כבר אינן חלק מהלסת אבל עדיין לא הפכו לעצמות האוזן?

אכן, כך נצפה. וציפיה זו אינה לשוא. יש בידינו סדרה שלמה למדי של מאובנים המייצגים כעשרה שלבים בהתפתחות עצמות הלסת של הזוחל לעצמות האוזן של היונק.¹⁰⁵

4. רגליים אחוריות של לוייתנים ונחשים

כבר הזכרתי מקודם (בפרק על האטביזם) את העובדה שלפעמים לוייתן נולד עם רגליים אחוריות. בסעיף זה איני מתייחס לתופעה זו אלא לתופעה המתרחשת בכל עובר של לוייתן ונחש.

104 גילברט, ביולוגיה התפתחותית.

105 ראה לדוגמא: קרדונג, אנטומיה השוואתית, עמ' 255-275.

לוייתנים ודולפינים מפתחים רגליים אחוריות - הכוללות עצמות, עצבים וכלי דם - במהלך ההתפתחות העוברית שלהם, אלא שהללו מתנוונים לפני הלידה.¹⁰⁶

בדומה, מינים רבים של נחשים ולטאות חסרות רגליים מפתחים ניצני רגליים במהלך ההתפתחות העוברית שלהם, אלא שניצנים אלה חוזרים ונספגים בגוף לפני הבקיעה.¹⁰⁷

5. הזנב האנושי

גם את הזנב האנושי הזכרתי לעיל בפרק על האטביזם. מסתבר אמנם שכל אחד מאיתנו גידל זנב בעברו. במהלך ההתפתחות העוברית, בין השבוע הרביעי לחמישי, מצמיח כל עובר אנושי זנב מורכב בעל 10-12 חוליות, המהווה למעלה מ-10% מאורכו הכולל של העובר!¹⁰⁸

בשבוע השמיני של ההריון, התאים המרכיבים את חוליות 6 עד 12 מתים ומעוכלים על ידי מקרופאגים בעוד חוליות ארבע וחמש מצטמצמות והולכות. בסופו של דבר נותר האדם הבוגר עם ארבע חוליות מאוחות שאינן בולטות מאחוריו. (ניתן לצפות בתהליך מרתק זה על שלביו השונים באמצעות תצלומים תלת-מימדיים של סריקת MRI של עוברים חיים, באתר של: The Multi-Dimensional Human Embryo).¹⁰⁹

106 סדמרה וחב', גפי דולפין, עמ' 25-30; אמסקי וחב', גפי לוייתן, עמ' 145-148.

107 ריינוד, מנגנון התפתחותי.

108 פלון וסימנדי, היעלמות זנב האדם, עמ' 111-129; מור ופרסוד, האדם המתפתח, עמ' 91-100; ניבלשטיין וחב', התפתחות עוברית, עמ' 21-31.

109 <http://embryo.soad.umich.edu/index.html>



עובר אנושי בעל זנב

עובר בשבוע השביעי להריון (הריון חוץ־רחמי). גודלו המקורי של העובר: סנטימטר בודד! בתמונה ניתן לראות בבירור את הזנב שייעלם עד תום ההריון, אלא אם כן תקרה "תקלה" והזנב ימשיך להתפתח, כפי שקורה לעתים (ראה בפרק על האטביזם).

6. שן-ביצה

זוחלים ועופות בוקעים מביצים. לצורך ביצוע משימה זו, מצוידים העוללים הרכים בבליטות קשות המאפשרות להם לבקע את הביצה בה הם נתונים. ללטאות ולנחשים צומחת בליטה קשה וחדה על אפם, ולעופות - בליטה קשה על המקור. בליטות אלה נעלמות אחרי כן.

היונקים, אינם בוקעים מביצים (למעט יונקי הביב הפרימיטיביים, ש"נתקעו" במחצית הדרך).

לפי האבולוציה, מקורם של היונקים בזוחלים, ומכאן שאבות אבותיהם של היונקים כן הטילו ביצים. ואכן, במהלך התפתחותם של יונקי הכיס ישנה תופעה מעניינת: מסביב לעובר נוצרת **באופן זמני** קליפת ביצה, שנספגת בחזרה לגוף ונעלמת לפני הלידה הממשית. למרות שבלידה עצמה כבר אין שום "קליפת ביצה", יש יונקי כיס שנולדים עם "שן-ביצה" כדוגמת זו של הזוחלים. הן הביצה הנעלמת והן שן הביצה מראות לנו שאבות אבותיהם של יונקים אלה בקעו מביצים.¹¹⁰

ו. התפוצה הגיאוגרפית של המינים

1. איי הים

בדרך כלל תופסים את האבולוציה כמתייחסת לציר הזמן בלבד. טענת האבולוציה היא שבעלי החיים שאנו רואים היום לא היו קיימים בצורה זו בעבר הרחוק, וכפי שאכן מראים הממצאים שהציגוטי למעלה.

אולם, לטענה זו יש גם היבט גיאוגרפי.

ציינתי לעיל קבוצות שונות של בני אדם המתייחדות ב"מטען גנטי" שונה מיתר בני האדם: תושבי האי פינגלאפ עיוורי הצבעים, בני הוואדומה בעלי שתי אצבעות כף הרגל, לצד תופעות פחות "בולטות" כמו היהודים האשכנזים בעלי השיעור הגבוה במובהק של פגם הטייזאקס, ועוד קבוצות רבות מספור של אוכלוסיות המיוחדות במטען גנטי מסוים. דבר אחד משותף לקבוצות אלה: הן מבודדות יחסית מיתר האוכלוסיה. בין אם הבידוד הוא כתוצאה ממכשולים

110 טינדיל-ביסקו ורנפרי, פיזיולוגיה של חיות כיס, עמ' 409.

גיאוגרפיים (כמו אצל בני פינגלאפ) או מחסומים תרבותיים (כמו אצל היהודים האשכנזיים) או משניהם גם יחד. קבוצות אלה אינן מתערבבות באוכלוסיה הכללית, וכך הן "מפתחות" תכונות ייחודיות להן (כזכור, על ידי מוטציות שמצטברות בקבוצות אלה או ששכיחותן עולה בקבוצות אלה הנפרדות מיתר האוכלוסיה).

הוא אומר, בדרך כלל על מנת שתיווצר קבוצה השונה במובהק מיתר האוכלוסיה, קבוצה זו צריכה להיות מנותקת מיתר האוכלוסיה, שאם לא כן סופם של השינויים שמתחוללים בה להתמזג ולהתערבב בחזרה עם התכונות של קבוצת האם ולהיטמע בה.

אחד הגורמים הראשיים לניתוק הוא החיים ב"אי" המנותק מיתר האוכלוסיה. אי זה אינו חייב להיות דווקא חבל יבשה המוקף במים מארבע רוחותיו שכן הוא יכול להיות באותה המידה: אגם המנותק מהים (אם המדובר בבעל חיים ימי), עץ המרוחק מיתר העצים (אם המדובר באוכלוסיית חרקים שוכני עצים) או נוה מדבר המוקף בחולות. כל אלה מוגדרים כ"איים" מבחינתנו.¹¹¹ עם זאת, הנושא שלהלן יעסוק באיים ממשיים.

פעמים רבות נתקלים אנו באי אשר החי והצומח שבו אינם קיימים ביתר העולם. מינים אלה נקראים "אנדמיים" לאי. ועולה השאלה: מנין הגיעו בעלי חיים וצמחים אלה לאי? ואם הם הגיעו מיתר העולם, מדוע אין להם זכר ביתר העולם?

התשובות האפשריות הן שתיים:

1. מינים אלה נבראו כפי שהם בכל אי ואי.
2. מינים אלה הגיעו בזמן מן הזמנים מהיבשות, ומכיון שהם התנתקו מהאוכלוסיה המקורית ממנה הם הגיעו וחיו בסביבה שונה מאותה אוכלוסיה, הם התפתחו במשך הזמן בכיווני התפתחות שונים מאשר האוכלוסיה המקורית והפכו למינים שונים של חי וצומח.

ובכן, על מנת לבחון נושא זה עלינו להבדיל קודם כל בין שני סוגים של איים:

111 מעניין שגם כאן אנו יכולים להעזר בדבריו של ה"ר גדליה נדל, הכותב בקשר ל"איי הגוים" (בראשית י, ה): "המלה 'אי' אין פירושה דוקא מקום המוקף מים... אלא כל איזור העומד בפני עצמו, המוגדר ומותחם בגבולות טבעיים, כגון הרים וכד', נקרא 'אי' ". (בתורתו של ר' גדליה, עמ' קכח).

א. איים "יבשתיים" - כלומר, איים שהיו בעברם מחוברים ליבשת וכיום הם איים, (בין אם מדובר באי שהיה מחובר בגשר יבשה שהוצף בעקבות עליית פני המים, ובין אם המדובר באי שהיה חלק מהיבשת והתנתק ממנה בעקבות תנועת הלוחות הטקטוניים). דוגמות לאיים אלה הם: האיים הבריטיים, יפן, סרי לנקה, טסמניה ומדגסקר. חלקם נפרדו מהיבשת לפני זמן רב (מדגסקר נפרדה מאפריקה לפני כ-160 מיליון שנה) וחלקם לפני זמן "קצר" (האיים הבריטיים נפרדו מאירופה לפני כ-300,000 שנה "בלבד").

ב. איי האוקיינוס - האיים אותם אנו מוצאים בלב האוקיינוס ומעולם לא היו מחוברים ליבשת. הללו התרוממו מקרקעית האוקיינוס, אם כהרי געש ואם כריף של אלמוגים. לדוגמא: איי הוואי, איי גלפגוס, סט. הלנה וקבוצת איי חואן פרננדז.

כאשר אנו בוחנים את איי האוקיינוס, לא משנה איזה אי ולא משנה באיזה אוקיינוס, אנו מגלים תמיד אותן התופעות:

1) בכל האיים הללו איננו מוצאים זוחלים¹¹² ויונקים יבשתיים, דוחיים או דגים של מים מתוקים. האי עשוי להיות עשיר במיוחד בצמחיה, בעופות, בחרקים וביונקים ימיים ומעופפים, אולם בכולם נעדרים אותם סוגים בעלי חיים שמנתי. (נוסף על כך, בדרך כלל לא נמצא שם עצים, מלבד עצי קוקוס ומלבד צמחים מעוצים שביתר העולם אינם מעוצים).¹¹³ במלים אחרות, אנו מגלים באיים אלה רק בעלי חיים שעשויים להגיע לאיים מן היבשת: בעלי חיים מעופפים, וחרקים זעירים העשויים להגיע כטרמפיסטים על המעופפים או להיסחף ברוח לאי או על גבי גזעי עצים שנסחפו במים וכדומה. גם זרעים עשויים להגיע באמצעות הרוח, או על גבי (ובתוך) בעלי החיים המעופפים. זרעי העצים, עם זאת, כבדים בדרך כלל ואינם צולחים את הדרך הארוכה, ואילו דגים של מים מתוקים

112 מלבד במקרים נדירים במיוחד. בשנת 1995 הגיעו איגואנות לאי Anguilla על גבי עצים גדולים עקורים שנסחפו באוקיינוס ממרחק של מאות קילומטרים (לורנס, איגואנות). אירועים נדירים כאלה אירעו אף בעבר. צבים, לעומת זאת, יכולים לצוף על שריונם, ולהתקיים תקופה ארוכה ביותר ללא מזון ומים, בעוד המים סוחפים אותם לאי מבטחים.

113 קוין, למה האבולוציה נכונה, עמ' 172 ואילך.

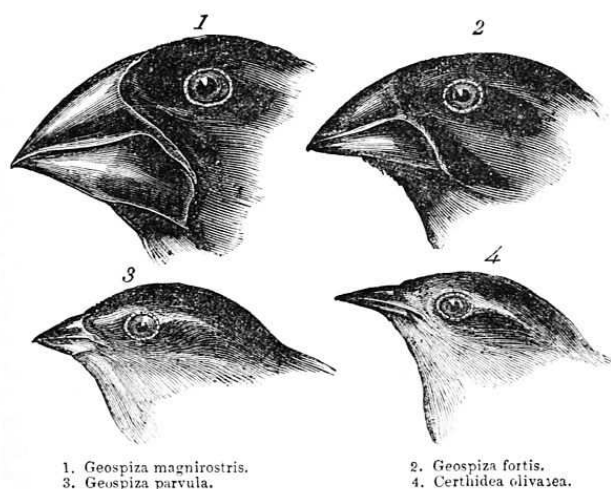
ודוחיים אינם שורדים את המים המלוחים שבדרך. העובדה שאין באי יונקים יבשתיים וזוחלים ודוחיים נובעת חד משמעית מכך שהם אינם יכולים להגיע לאי. אין באי שום דבר שמונע את שגשוגם של בעלי חיים אלה באי. ההיפך הוא הנכון. אינספור דוגמות מראות שכאשר הגיע האדם לאיים והביא עמו לראשונה בעלי חיים וצמחים מן היבשת, שגשגו הללו בצורה טובה אף יותר מן המקומיים.

(2) לצד בעלי החיים והצמחים החסרים באיים אלה בולט הגיוון הרב שיש באיים אלה למינים מקומיים: האי כאילו מפצה על דלות המינים הקיימים בו בכך שיש בו מגוון עשיר של מינים ותתי-מינים של בעלי חיים שאין כדוגמתם ביתר העולם ואשר כל אחד מהם מתמחה בגומחה משלו ומנצל בצורה ייחודית משלו את משאבי האי. דוגמא לכך הם הגיבתונים שמצא דרווין באיי גלפגוס ("פרושי דרווין"), הנבדלים זה מזה בגודל ובצורת המקור בשל התמחות כל מין ומין במקורות שונים של מזון. באי יש 14 מינים שונים של גיבתונים השייכים ל-6 סוגים שונים, והמהווים תת-משפחה בפני עצמה. (בסך הכול יש בעולם כ-283 מינים שונים של גבתונים, השייכים ל-71 סוגים שונים). דוגמא נוספת לכך היא זבוב הדרוזופיליה **שכמחצית** מאלפיים המינים השונים שלו נמצאים באיי הוואי (אשר שטחם הכולל הוא כ-0.004 אחוז מיבשות העולם).¹¹⁴

(3) מלבד מקרים יוצאי דופן, בעלי החיים והצמחים הנמצאים באיי האוקיינוס דומים וקרובים במידה הרבה ביותר לבעלי החיים והצמחים הנמצאים ביבשת הקרובה ביותר. התופעה הזו אינה נובעת מתנאי שטח דומים, שכן תנאי השטח השוררים באי עשויים להיות שונים מאד מהתנאים שביבשת הסמוכה (לדוגמא, איי גלפגוס הם איים יבשים ונטולי עצים השונים במידה רבה מאמריקה הטרופית הסמוכה לה).

114 קוין, למה האבולוציה נכונה, עמ' 177.

הראיות למוצא המינים באמצעות אבולוציה



"פרושי דרווין"

איור זה, מעשה ידיו של הזואולוג ג'ון גולד (John Gould) מעטר את ספרו של דרווין "מסעה של הביגל" ומתאר את ההבדלים שנוצרו במקורם של הגבתונים השונים בהתאם למזונם.

הבה נסכם:

אנו מגיעים לאי מאיי האוקיינוס. אנו מגלים שם מגוון של בעלי חיים וצמחים ומצד שני אנו מגלים שחסרים באי כמה סוגים חשובים של בעלי חיים. אנו מגלים שכל בעלי החיים והצמחים שבאי הם כאלה שעשויים היו להגיע מן היבשת, וכי כל בעלי החיים החסרים באי הם מהסוג שלא יכול להגיע לאי מהיבשת. אנו מגלים שהמינים שבאי מגלים את הדמיון הרב ביותר למינים שביבשת הסמוכה, למרות שאין שום דמיון בתנאי השטח של שני המקומות. ואנו מגלים שמינים אלה שונים, עם זאת, מהמינים שביבשת הסמוכה ושהם מגלים גיוון רב ופיצול למינים ותתי מינים רבים.

מה אנו יכולים להסיק מכאן?

המסקנה פשוטה בתכלית. יישובו של אי מבודד ורחוק הוא תופעה נדירה וקשה ליישום. ועם זאת, בהינתן הזמן הנדרש היא אכן מתרחשת, והאיים המבודדים - מיושבים בעופות וחרקים וצמחים שהגיעו אליהם בדרכי האויר והים.

בעלי חיים וצמחים אלה מגיעים לסביבה החדשה הפנויה ואט אט משתלטים על כל גומחה באי ומתפתחים למינים חדשים.

כיצד זה קורה בפועל? דוגמא פשוטה: ציפורים שהתמחו ביבשת באכילת זרעים מסוימים מגיעות לאי ומגלות שהאי מציע זרעים מסוגים אחרים וחרקים מחרקים שונים. הסביבה החדשה מקנה יתרון הישרדותי לאותן ציפורים שבדרך זו או אחרת נולדו עם מקור המותאם יותר לאכילת סוגי הזרעים השונים שמציע האי וסוגי החרקים השונים (ובין אם מדובר במקור עבה יותר במעט, דק יותר, ארוך / קצר / מעוקל / חזק / עדין). מתוך ציפורים אלה ילכו עם הזמן ויתפתחו מינים מובחנים שכל אחד מהם מתמחה במלאכת הקיום שלו. אבותיהם שביבשת לא ישתנו בכיוונים הללו משום שהיבשת מציעה הזדמנויות אחרות, או משום שביבשת הן התמחו בסוג מסוים של מזון בעוד אשר סוגי המזון האחרים "נתפסו" כבר על ידי בעלי חיים שפיתחו כבר לפני כן התמחות לאותם סוגי מזון.

2. איים יבשתיים

כאמור, תופעות אלה שונות באיים היבשתיים שהיו מחוברים בעברם ליבשת ולכן יכלו להכיל את כל מגוון היצורים החיים: יונקי יבשה, זוחלים, דוחיים ועוד, לפני שהתנתקו מן היבשת.

אולם, לפי האבולוציה, עדיין אמור להיות הבדל בין איים שהתנתקו מן היבשת לפני זמן רב לבין איים שהתנתקו לפני זמן קצר: ככל שהאי התנתק לפני זמן רב, אנו אמורים למצוא בו מגוון דל יותר של בעלי החיים המצויים בשאר העולם, ולעומתו מגוון של בעלי חיים שקיימים רק באי זה שהתפתחו בו אחרי שהוא נפרד מן היבשת.

ואכן, זה בדיוק מה שאנו מוצאים.

מדגסקר, לדוגמא, הוא אי שהתנתק לפני כמאה ושישים מיליון שנה מאפריקה. באי זה אנו מוצאים חי וצומח ייחודיים, ביניהם משפחת הלמוריים על סוגיהם

ומיניהם שהם פרימטים הנמצאים כיום באי זה בלבד ואשר התפצלו ל-75 מינים (מהם שרדו כיום 22 מינים).

גם האי נירזילנד מציג תמונה דומה, ובו מספר עופות לא-מעופפים הקיימים באי זה בלבד (כגון הקיווי המפורסם, התוכיליל, והמואה - אותו עוף בגובה 3 מטרים שנכחד על ידי המתישבים המאורים לפני כחמש מאות שנה). בנוסף, יש בנירזילנד רק מינים בודדים של זוחלים, מין אחד בלבד של דוחיים, ושני יונקים מעופפים - עטלפים (אם כי לאחרונה נתגלה בה מאובן של יונק קטן). כמו במקרה של איי האוקיינוס, בעלי החיים והצומח של מדגסקר ונירזילנד מגלים את הדמיון הרב ביותר ליבשות שלידן (אפריקה ואוסטרליה, בהתאמה).

3. אוסטרליה: לא על הקנגרו לבדו

יבשת אוסטרליה מציגה תופעה מעניינת הקשורה אף היא לתפוצת בעלי החיים:

כזכור, עד לפני כמאתיים מיליון שנה היו היבשות כולן מחוברות ביבשת-על אחת שנקראת פנגיאה. יבשת-על זו התפצלה לשתי יבשות: גונדוונה (אמריקה הדרומית, אפריקה, אנטארקטיקה, אוסטרליה, הודו, ערב), ולאוראסיה (אמריקה הצפונית, אירופה, אסיה). יבשת גונדוונה הלכה והתפצלה אף היא, כשהחלק המזרחי שלה (אוסטרליה, אנטארקטיקה והודו) מתפצל מהחלק המערבי (ערב, אפריקה ואמריקה הדרומית). אחר כך נטשה הודו את המערכה, ולבסוף נפרדו גם אוסטרליה ואנטארקטיקה.

"בסופו של דבר" מצאה אוסטרליה את עצמה מנותקת משאר העולם, בעוד היבשות אסיה, אירופה ואפריקה מחוברות זו לזו בצורה הדוקה, ובעוד גוש יבשות זה מחובר בסופו של דבר גם ליבשות אמריקה הצפונית והדרומית באמצעות גשר היבשה שהיה קיים בין אלסקה לבין סיביר.

אוסטרליה היא אפוא יבשת שכללה מגוון רחב מאד של חי וצומח, שהתנתקה והתפתחה בנפרד מיתר העולם.

ואכן רוב החי של אוסטרליה מיוחד ליבשת זו. אם להיכנס לפרטים: 83% מהיונקים, 89% מהזוחלים, 90% מהדגים והחרקים ו-93% מהדוחיים החיים באוסטרליה מיוחדים ליבשת זו ואינם מצויים ביתר העולם.

העובדה הבולטת והידועה ביותר לגבי אוסטרליה היא העדרם היחסי של יונקי השליה,¹¹⁵ שהם היונקים שאנו מכירים סביבנו. במקום יונקי השליה, משגשים באוסטרליה מאות מינים של יונקי כיס (שהמפורסם שבהם הוא הקנגרו). אחת התופעות המעניינות בהקשר זה היא העובדה שיונקי הכיס ממלאים באוסטרליה אותם תפקידים שממלאים במקומות אחרים יונקי השליה, ומי שאינו חד עין עשוי שלא להבחין בכך שמדובר במינים שונים לחלוטין. וכך אנו מוצאים חפרפרת-כיס, ועכבר-כיס וכיסנאי (דמוי סנאי דואה) הדומים (חיצונית) באופן מפתיע ליונקי השליה הללו, למרות שאין ביניהם קרבה (לתופעה כזו קוראים "אבולוציה מתכנסת").

כפי שכבר ציינתי, יונקי הכיס הגיעו לאוסטרליה מאמריקה דרך אנטארקטיקה כאשר אלו היו עדיין מחוברות, אלא שבאמריקה לא זכו יונקי הכיס המתחרים עם יונקי השליה לשגשוג ולעדנה לה זכו באוסטרליה.

בעלי חיים המיוחדים אף הם לאוסטרליה ולאיים הסובבים אותה הם יונקי הביב, אותם בעלי חיים מיוחדים שהתפצלו מיתר היונקים אי שם בראשית דרכם של היונקים ונשארו מטילי ביצים. רק חמישה מינים כאלה ידועים כיום ומתוכם שניים שרדו באוסטרליה ושלושה באיים אחרים באותו האזור.

יבשת מופלאה זו מציגה לנו אפוא בצורה עשירה ומגוונת יותר אותה התופעה שאנו מוצאים באיים היבשתיים: מינים שהגיעו מיבשות אחרות, ואשר נכחדו ביבשות המוצא בעקבות תחרות עם מינים שהצליחו טוב מהם (יונקי השליה), ושרדו והתפתחו במגוון צורות ב"יבשת המקלט" שהתנתקה לפני בוא המתחרים המוכשרים.

ז. ביולוגיה מולקולרית

לצד השוואת בעלי חיים על פי מאפיינים אנטומיים ומורפולוגיים, נכנסו לשימוש בעשורים האחרונים אמצעים נוספים ורבי-עוצמה מתחום הביולוגיה המולקולרית.

115 ביבשת נמצאים יונקי שליה מעופפים: עטלפים, וכן מכרסמים. הללו הגיעו לאוסטרליה בתקופה מאוחרת יחסית, ולא יכלו לדחוק משם את יונקי הכיס. יונקי השליה האחרים הנמצאים ביבשת, כגון הדינגו, הובאו לשם לפני כמה אלפי שנים בלבד על ידי האדם.

המדובר הוא בהשוואת חלבונים מבעלי חיים שונים, ובהשוואה ישירה של המטען הגנטי עצמו: מולקולת הדנ"א.

1. השוואת חלבונים

כידוע, מורכב כל חלבון משרשרת אחת, או ממספר שרשרות, שהחוליות שלהן הן חומצות אמינו. השוואת חלבונים של מינים שונים כרוכה בבדיקה והשוואה של מספר השרשרות שמרכיבות את החלבון המסוים, ואת רצף חומצות האמינו המרכיבות כל שרשרת. כזכור, "הוראות הייצור" של החלבונים הם בדנ"א, כאשר כל מקטע דנ"א שמכיל הוראות ייצור לחלבון מסוים קרוי "גן". מוטציות הפוגעות בגן יגרמו לשינויים במבנה החלבון המיוצר, קרי, ברצף חומצות האמינו שלו. הניבוי האבולוציוני טוען שאם נשווה חלבון מסוים של שני בעלי חיים, כי אזי ככל ששני בעלי חיים נפרדו זה מעל זה לפני זמן קצר יחסית (גניח זברה וסוס), יתגלה ביניהם יתגלה דמיון רב יותר בהרכב החלבון הנבדק, והשינויים הנובעים ממוטציות שונות שאירעו בחלבון מאז נפרדו בעלי החיים זה מזה יהיו זעומים. ולעומת זאת, ככל שבעלי החיים רחוקים זה מזה (כלומר, נפרדו מאב משותף לפני תקופה ארוכה יותר, כגון זברה וקרנף), נגלה שיעור רב יותר של שינויים בהרכבו של החלבון, שכן ככל שעובר זמן רב יותר כן מתרחשות בכל מין בנפרד מוטציות רבות יותר, ואלו גורמות להצטברות של הבדלים בין המינים.

ואכן, התמונה העולה מהשוואת רצפי החלבונים השונים מאוששת את הניבוי הזה. ולדוגמא אביא את סיפורו של אחד החלבונים החשובים בגוף: ציטוכרום סי.

ציטוכרום סי

ציטוכרום הוא שם כולל לקבוצה של חלבונים המכילים אטום ברזל ואשר משמשים בתפקידים חשובים בחילוף החומרים שבתא.¹¹⁶ ציטוכרום סי נמצא בכל היצורים החיים: מחיידק ועד לפיל.

116 הציטוכרום ממלא תפקיד "נשא אלקטרונים" (מסירה או קליטה של אלקטרונים) בשלב האחרון של הנשימה התאית שנקרא "זרחון חמצוני".

ציטוכרום סי הוא אפוא חלבון חיוני במיוחד. המעניין הוא שניתן "לבנות" חלבון שכזה במגוון רב של אפשרויות, כלומר מגוון רב של רצפים גנטיים שונים ואפילו רצפים השונים אלה מאלה לחלוטין (כפי שנצפה בסוגים שונים של חיידקים) יניבו עדיין חלבון שמתפקד כשורה.¹¹⁷

לדוגמא, התברר שציטוכרום סי אנושי שהוחדר לשמרים (שמהם הוציאו את הציטוכרום סי המקורי שלהם), תפקד כשורה בשמרים, למרות שהציטוכרום המקורי של השמרים שונה ב-40% מהציטוכרום האנושי. וכן הדבר בציטוכרומים של דג הטונה, יונה, סוס, חולדה וזבוב הדרוזופילה - שהוחדרו לשמרים ותפקדו כשורה למרות השוני שבין חלבונים אלה.¹¹⁸

החוקר יוקי חישב ומצא שיש לא פחות מ- $10^{93} \times 2.3$ רצפים גנטיים שונים שיכולים לבנות חלבון ציטוכרום סי שמתפקד כשורה.¹¹⁹ לשם המחשה אציין כי המספר 10^{93} גדול בערך פי מיליארד ממספר האטומים ביקום הנראה. ניתן אפוא לומר בשקט שיש אינסוף רצפים גנטיים אפשריים לבניית חלבון ציטוכרום סי מתפקד.

כאשר אנו בודקים ומשווים את הרצפים הגנטיים של ציטוכרום סי של יצורים חיים שונים, אנו מגלים שהרצף של האדם ושל השימפנזה **זהה לחלוטין**. הרצף של האדם והשימפנזה שונה מהרצף של יתר היונקים בשיעור של עד עשר חומצות אמינו. כשאנו בודקים את אחד היצורים הרחוקים ביותר מן האדם: השמר קנדידה (*Candida krusei*) אנו מגלים שהשוני ביניהם מתבטא ב-51 חומצות אמינו בלבד. הדמיון הזה אינו נובע ואינו מוסבר מאורח חיים דומה, אלא ממוצא משותף. ראיה מסוימת לכך ניתן למצוא בעובדה שציטוכרום של עטלף דומה לציטוכרום אנושי יותר מאשר לציטוכרום של ציפור, וציטוכרום של דולפין דומה יותר לציטוכרום אנושי מאשר לציטוכרום של כריש, למרות שמבחינת אורח חייהם, דומה העטלף לציפור והדולפין לכריש.

117 מור ופטיגור, ציטוכרום סי.

118 טנקה וחב', ציטוכרום סי; אשיקרי וחב', ציטוכרום סי; וואלאס וטנקה, ציטוכרום סי; קלמנטס וחב', ציטוכרום סי, היקי וחב', ציטוכרום סי; קושי וחב', ציטוכרום סי, סקרפולה וניי, ציטוכרום סי.

119 המפסי וחב', ציטוכרום סי; המפסי וחב', ציטוכרום סי ב'; יוקי, ביולוגיה מולקולרית.

בהתאם לציפיה, אילן היוחסין המבוסס על הדמיון והשוני ברצף הגנטי של ציטוכרום סי תואם במדויק לאילן היוחסין המבוסס על המורפולוגיה של בעלי החיים ומהווה ראיה נוספת לכך שאילן זה משקף קרבת משפחה ממשית.¹²⁰

2. השוואת דנ"א

טכניקה ישירה יותר לבדיקת הקרבה בין בעלי החיים היא השוואת מולקולות הדנ"א עצמן.

בעשור האחרון הושלם פיענוח רצפים רבים של דנ"א: המטען הגנטי שעושה אותנו למה שאנו. כפי שצינתי בסעיף הקודם שעסק בהשוואת חלבונים, ההיגיון האבולוציוני טוען שככל שהקרבה בין שני יצורים גדולה יותר (כלומר, נפרדו מאב משותף לפני זמן קצר יחסית) כן יהיה המטען הגנטי שלהם דומה יותר, ביחס לשני יצורים שנפרדו מאב משותף לפני זמן רב יותר.

אנו נצפה אפוא שהדמיון הגנטי של בני אותה משפחה יהיה דומה יותר מאשר לבין נוכרי, וכי הדמיון הגנטי בין אדם לבין פרימטים אחרים יהיה גדול מהדמיון לסוסים או לנמרים, וכי הדמיון הגנטי ליתר היונקים יהיה גדול מהדמיון לזוחלים, והדמיון לזוחלים יהיה גדול מהדמיון לדגים, וכן הלאה.

"למרבה הפלא" זה בדיוק מה שאנו מוצאים. גם כאן, כמוכך, הדמיון אינו נובע מאורח חיים דומה או מתנאי הסביבה דומים, אלא ממוצא משותף. אדם, עטלף ולויתן דומים זה לזה בהרבה מאשר ללא־יונקים אחרים המשקפים אורח חיים דומה.

עד כאן הכול טוב ויפה, אבל זו רק ההקדמה לסיפור העיקרי:

הדנ"א מורכב כאמור מגנים המופקדים על יצירת החלבונים השונים להם נזקק הגוף. אולם, גנים אלה אינם תופסים אלא חלק מהדנ"א, ונוסף עליהם יש בדנ"א חומר גנטי רב שאינו מקודד אף חלבון, ואשר מכיל פסאודוגנים, רטרווירוסים אנדוגניים וטרנספוזונים אשר בהם נעסוק בקטע שלהלן ואשר חושפים בפנינו מידע רב ערך.

120 מקלפלין ודייהוף, אבולוציה איאוקריוטית.

1) פסאודוגנים

כבר הזכרנו לעיל את הפסאודוגנים: גנים "מתים" ומנוונים, שבעקבות מוטציה שאירעה בהם - אינם מתפקדים. התקלות עשויות להיות כמובן שונות ומגוונות ברחבי הרצף הגנטי המרכיב את הגן המדובר. בחלק גדול מן המקרים מדובר בגן שהכפיל את עצמו ואחר כך אירעה מוטציה באחד מהעותקים. אם אנו מוצאים שני יצורים שלהם יש אותו פסאודוגן, אין הדבר כשלעצמו מהווה ראיה, שכן ייתכן שאותו גן ניזוק במקרה בבעל חיים אחד וגם בבעל חיים שני. אולם, אם טיב התקלה - השיבוש שנפל בגן - הוא **בדיוק אותו הדבר** בשני בעלי החיים, או אם מיקומו של הפסאודוגן בכרומוזום הוא **בדיוק באותו המקום** בשני בעלי החיים, זה כבר סיפור אחר לגמרי, והוא מחזק את ההשערה שלשני יצורים אלה יש אב משותף שבו אירעה תקלה זו ואשר הוריש אותה כמובן לכל צאצאיו.

ואכן ידועים פסאודוגנים רבים המשותפים לאדם ולפרימטים. אחד מהם הוא ה־globin¹²¹, פסאודוגן של המוגלובין. הוא קיים רק בקרב הפרימטים (והאדם) ובדיוק באותו המקום בכרומוזום, ובדיוק עם אותה התקלה שהרסה את יכולתו לקודד חלבון.¹²¹

דוגמא נוספת הוא הגן hydroxylase²¹. לבני האדם יש שני עותקים של גן זה, האחד תקין והאחר הוא פסאודוגן. התקלה בפסאודוגן נוצרה בעקבות מוטציה ש"מחקה" שמונה זוגות בסיסים בגן. מחיקה זו בדיוק משותפת לאדם ולשימפנזה.¹²²

2) רטרווירוסים אנדוגניים

הרטרווירוסים הם נגיפים אשר מעתיקים את החומר התורשתי שלהם לתוך הדנ"א של הפונדקאי ומשתלבים בדנ"א של הפונדקאי. אם הנגיף תוקף תאי רבייה ומשלב את הדנ"א שלו בתא, מידע זה יעבור לדור הבא. במקרה זה, יש לנו עסק עם "רטרווירוס אנדוגני", כלומר רטרווירוס שהשתלב במטען הגנטי שלנו לעד. רטרווירוסים אנדוגנים מייצגים אפוא חומר תורשתי נגיפי שתקף בעבר את אבותינו

121 גודמן וחב', פילוגניה מולקולרית.
122 קאוואגוצ'י וחב', מקור אבולוציוני.

והשתלב בדנ"א שלנו. גם כאן, אם נמצא בקרב שני נבדקים אותו רטרווירוס הממוקם **באותו המקום בדיוק** בדנ"א שלנו, הדבר יצביע על כך שיש להם אב משותף.

בגנום האנושי, תופסים הרטרווירוסים האנדוגניים סך 8% מכלל החומר התורשתי, בשיעור של עד כ-98,000 רטרווירוסים וחלקי רטרווירוסים בדנ"א האנושי.¹²³ נכון להיום, ידועים שבעה רטרווירוסים משותפים בינינו לבין השימפנזים, מספר הצפוי לעלות ככל שתתקדם השוואת הרצפים הגנטיים.¹²⁴ גם הרטרווירוסים מאפשרים יצירת אילן יוחסין המצביע על הקרבה בין הפרימטים השונים, ובכללם האדם.¹²⁵ שלא במקרה, אילן יוחסין זה מתאים לידוע מאילנות יוחסין המבוססים על מקורות אחרים.

(3) טרנספוזונים

הטרנספוזונים, הנמצאים בכל רחבי עולם החי, הם קטעי דנ"א "טפיליים" חסרי משמעות תורשתית הנמצאים בגנום ואשר יכולים לשנות את מיקומם בגנום, ומכאן כינויים "גנים קופצים". יש טרנספוזונים ש"קופצים" בשיעור של פעם בכל מאתיים לידות.¹²⁶ קפיצות אלה הן בעיקרן שרירותיות ותורמות לשונות הגנטית שבין בני האדם,¹²⁷ ואף מסייעות בזיהוי יחסי קרבה בין בני אדם ובין בעלי חיים: אם אנו מוצאים טרנספוזונים באותם המיקומים בגנום בקרב שני בני אדם או שני בעלי חיים הרבה מעבר למתחייב על פי ההסתברות המקרית, הדבר מורה על מוצא משותף של שני הנבדקים.

לדוגמא: בין הטרנספוזונים הנפוצים הם אלו שנקראים Alu. לכל היונקים יש מספר רב של "אלו". באדם, תופסים טרנספוזונים אלה עשירית מהגנום האנושי.¹²⁸ חלק מה"אלו" הללו הם חדשים, כלומר הם נמצאים בקרב חלק מבני האדם ונעדרים

123 בלשוב וחב', רטרווירוסים.

124 בונר וחב', רצפים רטרוויראליים; דנג'ל וחב', מרקר פילוגנטי; סבסון וחב', גנים פרימטיים; קילמן וחב', רצפי רטרווירוסים; לבדב וחב', הבדלים; סברדלוב, רטרווירוסים.

125 לבדב וחב', הבדלים.

126 דיינינגר ובצר, חזרות אלו ומחלות.

127 בצר ודיינינגר, חזרות אלו ומגוון.

128 סמית, מקור החזרות.

אצל אחרים, והללו משמשים ככלי עזר להתחקות אחר תפוצתו של האדם על פני האדמה.¹²⁹ טרנספוזונים כאלה משמשים גם כן לקביעת אבהות ובפיענוח פשעים.¹³⁰

בחלבון "גלובין-אלפא" יש שבעה "אלו", ושבעת ה"אלו" הללו משותפים לנו ולפרימטים **בדיוק באותם שבעה מקומות.**¹³¹

שלושה טרנספוזונים שונים נמצאו בדיוק באותם המקומות בקרב לוויתנים, היפופוטמים ומעלי גירה, אולם לא נמצאו בקרב חזירים וגמלים.¹³² משמעות הדבר היא שלבעלי חיים אלה (כלומר, ללוויתן, להיפופוטם ולמעלי הגירה) יש אב משותף אשר בו אירעו שלושת הטרנספוזונים הללו ומשום כך הם נוכחים בצאצאיו השונים הללו, וכי אירועים אלה קרו אחרי שאותו אב משותף התפצל מיתר מכפילי הפרסה.

129 נוביק וחב', אלו פולימורפי; נוביק וחב', אלו כמרקר לזיהוי.

130 נוביק וחב', אלו פולימורפי; רוי-אנג'ל וחב', אלו ומגוון.

131 סאוואדה ווילארד, חזרות אלו.

132 שיממורה וחב', רטרופוזונים.