

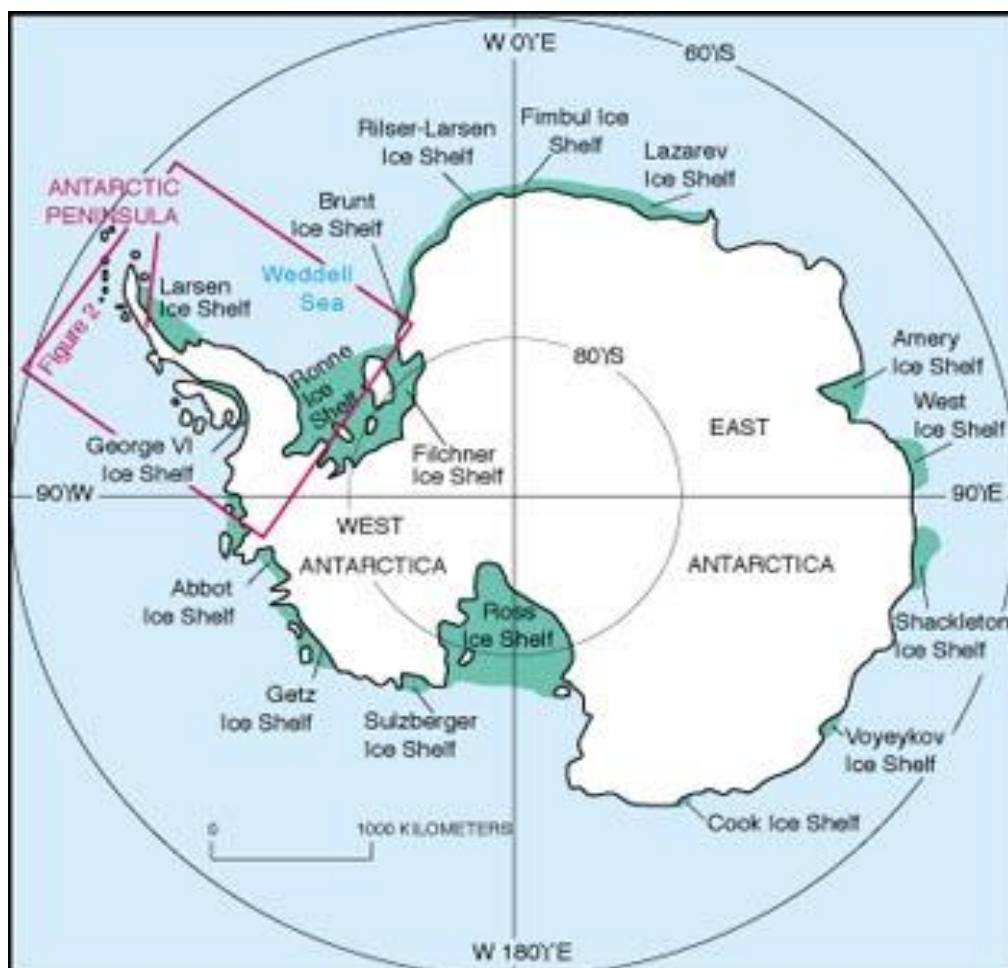
יעלי אטשטיין

עבור ביה"ס למדעי הים והסביבה הימית במכמורת –

המרכז האקדמי רופין. תשס"ח (2008)

## השפעת ההתחממות הגלובלית

### על החי באנטרקטיקה



Clarke et al. 2006

## תוכן עניינים

עמוד 3	תקציר
עמ' 4 - 5	מבוא
עמ' 5 - 6	תגובת עולם החי להתחממות גלובלית
עמ' 7 - 8	מארג המזון באנטרקטיקה
עמ' 9 - 11	תפוצת הקריל האנטרקטי
עמ' 12 - 13	השפעת ההתחממות על טורפי העל
עמוד 14	סיכום
עמ' 15 - 16	ביבליוגרפיה

## תקציר

בחמישים השנים האחרונות נצפתה באנטרקטיקה עלייה של כ-  $2-6^{\circ}\text{C}$  , פי שלוש יותר מאשר בשאר האזורים בעולם. להתחממות האטמוספירה מעל אנטרקטיקה יש השפעה מכרעת על מדפי הקרח, עונת הקרח התקצרה והקרחונים נסוגו. מחזור החיים של בעלי החיים באנטרקטיקה מסונכרן עם עונת הקרח ולכן הם יהיו יותר רגישים לשינויים בקרח, במיוחד לזמן הופעתו ופחות לתפוצתו. בעבודה זו אציג את ההשפעה של השינויים האביוטיים על החי באנטרקטיקה. מארג המזון נשען על מבנה עיקרי של יצרנות ראשונית ע"י צורניות, קריל המהווה צרכן ראשוני וטורפי על. כאשר איזון זה מופר כעת עקב ירידה בזמינות הקרח, ניתן לראות בכל הרמות הטרופיות שינויים בהרכב המינים הדומיננטיים. מגמת השינוי הכללית מראה על כניסה של מינים המותאמים לטמפרטורות גבוהות יותר ולירידה במינים התלויים בקרח. ברמת היצרנים הראשוניים, ניתן להבחין במעבר מדומיננטיות של צורניות לדומיננטיות של דינופלגלטים. ברמת הצרכנים הראשוניים, אוכלוסיית הקריל האנטקרטי, *Euphausia superba* , המהווה מין המפתח באנטרקטיקה, נמצאת בירידה ואילו המין הטוניקטי *Salpa thompsoni* מצוי בעלייה. הסיבה לכך נעוצה בעובדה שהקריל תלוי בקרח להגנה, מזון וגיוס לרוות לעומת הסלפה המואמת לבית גידול ללא תנאים אלה. סמן נוסף לשינויים בהרכב המינים ניתן למצוא אצל אוכלוסיות הפינגווינים השונות, במחקרים שנעשו על מושבות של מינים שונים בהם *Adelie (Pygoscelis adeliae)* , chinstrap ו- gentoo. בעלי אסטרטגיות חיים מנוגדות בנוגע לתלות בקרח הראו ירידה במינים התלויים בקרח ואילו עליה במינים טולרנטיים לקרח. השינוי ביבשה ניכר יותר מאשר במים והשינויים בביוטה יותר בולטים ומאפשרים לנו הצצה אל השינויים שאנו עתידים לראות בעולם החי הארקטי.

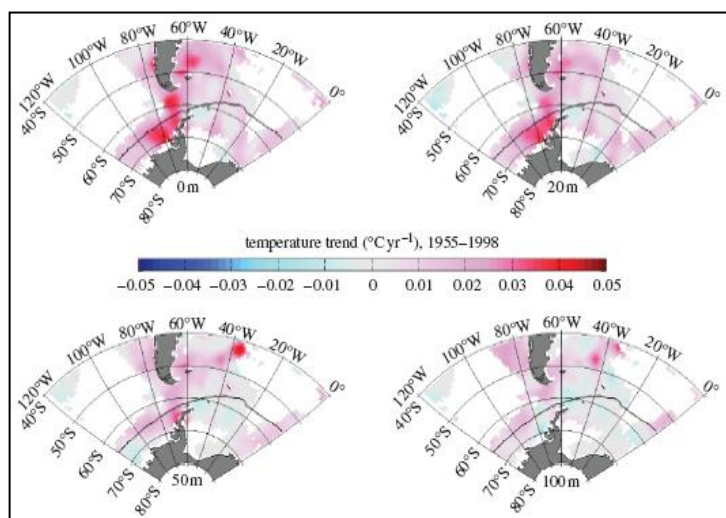
## מבוא

חצי האי האנטרקטי הוא אחד האיזורים אשר חווים את אחד מהשינויים האקלימיים המהירים ביותר בכדור הארץ. התמוטטותם של מדפי קרח, נסיגה של קרחונים וחשיפתם של בתי גידול יבשתיים חדשים התרחשו במקביל לעלייה ממוצעת של  $1.5^{\circ}$  מאז 1950, בהשוואה לעלייה עולמית ממוצעת של  $0.6^{\circ}$  (Ducklow et al., 2006).

מתוך כלל השינויים שנצפו עד כה באקוסיסטמה הימית של חצי האי המערבי של אנטרקטיקה (West Antarctic Peninsula – WAP), נחשבים השינויים בדינמיקה של מצעי הקרח היבשתיים למשפיעים ביותר על החי הימי, בעיקרון עקב שינויים בתפוצה ובמשך הזמן בו בית גידול זה זמין לביטוה. משך הזמן בו שוררים תנאים להמסתם של גושי קרח אלה התארך בצורה ברורה בחצי האי, כאשר מרביתם של הקרחונים הראו על נסיגה במהלך חמישים השנה האחרונות, בקצב הולך וגדל. נוספים לכך רישומים של התמוטטויות מרשימות של מדפי קרח אשר הובילו לאובדן של שבעה קרחונים בתקופת זמן זו.

במערכת האוקיאנית סביב לחצי האי, ניכרה ההתחממות בירידה בכמות הקרח הימי בימים בלינגשאוזן ואמנדסן בקצב מסחרר של כ-10% לעשור ומשך הזמן העונתי בהם התקיימו התקצור.

שינוי נוסף שנצפה היה בטמפ' המים. כפי הנראה באיור 1, עיקר ההתחממות התרחשה בשכבת המים העליונה אשר התחממה בלמעלה ממעלה אחת מאז 1955. עוד נראה כי מי העומק הסובבים את הקוטב הצפוני (Circumpolar Deep Water – CDW) התחממו אף הם באזורים הקרובים ליבשת (Ducklow et al., 2006).



איור 1: מגמות השינוי בטמפ' המים בקיץ בשנים 1955-1998, עבור ארבע שכבות עומק.

קשה להסביר את הסיבות להתחממותו של חצי האי, בשל העובדה כי ישנם אזורים באנטרקטיקה בהם לא נצפו שינויים כלל ואחרים שאף הראו מגמה של התקררות, ומכיוון שעוד לא נבנו מודלים אקלימיים שהצליחו לדמות מציאות שכזו. יחד עם זאת, מידע חדש מראה על התאמה חזקה בין סירקולציה אטמוספרית מקומית שהופכת יותר ציקלוגית לבין עלייה בטמפ' האוויר מעל חצי האי (Turner et al., 2005).

העדות הטובה ביותר לשינויים שהתרחשו לאחרונה באקוסיסטמה מגיעה מיצורים אשר זכר לדינאמיקות האוכלוסייה שלהם ניכר בשלדיהם או היכן שאינטראקציות אקולוגיות נשמרו. בנוסף, תזוזה דרומה של איזותרמות ימיות עלול להשרות נדידה של מינים בצורה דומה לזו שנצפתה על פני היבשה.

המבנה הבסיסי במארג המזון של האוקיינוס הדרומי דומה לזה של כל אוקיינוס אחר. המבנה בעיקרו מעונף עם מסלולי מעבר אנרגיה מרמת היצרנים הראשונים לזואופלנקטון הרביבורי, המעגל המיקרוביאלי והפאונה הבנטית (Clarke et al., 2006). הזואופלנקטון ההרביבורי כולל קופיפודים, סלפות ואת הקריל האנטרקטי *Euphausia superba* אשר עפ"י תור תופסים שליטה על היצרנות ומכאן גם על שטפי האנרגיה במקומות ובזמנים שונים.

הקריל האנטרקטי תופס עמדת מפתח באקוסיסטמה הן בשל העובדה שהוא מהווה את טרפם של יונקים וציפורים ימיות רבים באזור והן בשל היותו חלק חשוב במעגל הפחמן כרועה דומיננטי של פיטופלנקטון המייצר גללים אשר שוקעים מהר אל הקרקעית (Ducklow et al., 2006). אותם מדפי קרח הסובבים את חצי האי האנטרקטי, בהם ניכרות השפעותיה של ההתחממות כאמור, הוצעו כאזורי המקור להתפתחות אוכלוסיות של לרוות וקריל צעיר, האחראים על הביומסה הגבוהה ברמת האגן האוקיאני כולו (Atkinson et al., 2004). ההבחנה בהתאמה הקיימת בין הירידה בזמינות בית הגידול הקרחוני לבין הירידה בצפיפות מין מפתח כמו הקריל, מציגה מנגנון השפעה אפשרי של ההתחממות הגלובלית על מארג המזון כולו באקוסיסטמה.

## תגובת עולם החי לשינויים אקלימיים

אוכלוסיה של מין מסוים אשר חווה שינויים אקלימיים מחוץ לטווח הנורמלי של התאמתם הפנוטיפית לסביבה, יכולה להגיב בשלושה אופנים שונים: (1) הגירה – המין משנה את תפוצתו לאזורים בעלי תנאים מועדפים, (2) הסתגלות – המין מפתח תכונות פנוטיפיות חדשות המתאימות לתנאי הסביבה החדשים, (3) הכחדה – כתוצאה מכישלון של המין להגר או להתאים עצמו לסביבה הוא נעלם מבית הגידול (Clarke et al., 2006).

עדויות ממאובנים של אורגניזמים ימיים מספקות הוכחה לכך שכל שלושת התגובות הללו התרחשו בעבר, כתלות גדולה בסביבה הגיאוגרפית. במקומות בהם חיו בעלי חיים לאורך קווי חוף גדולים, התגובה העיקרית הייתה נדידת מינים, פשוט בשל האפשרות לעשות זאת. לעומת זאת תצורת נוף של קבוצות איים מפוזרים יוצר קיטוע והגבלה של טווח התזוזה המובילים לפתרון של הסתגלות או הכחדה. אחד המקומות באוקיינוס הדרומי בהם יש תצורת חוף קווית עבור בעה"ח היא חצי האי האנטרקטי, אשר לאורכו הם נודדים.

ברמת תגובת היצור הבודד לשינויים אקלימיים, ידוע כי אורגניזמים ימיים המותאמים לטמפרטורות נמוכות מפגינים בדר"כ תכונות פיזיולוגיות נמוכות יותר מאשר יצורים אשר חיים במים חמים יותר, כגון גדילה, קצב התפתחות ותנועתיות (Clarke et al., 2006). הדבר יכול לרמז על השפעתה של התחממות המים לטובתם של אורגניזמים רבים בשל היכולת לשפר את התפקוד הפיזיולוגי. גורם זה אינו בהכרח נכון כיוון שאצל הרבה מינים ההתאמה לטמפ' קרות

הינה לטווח טמפ' צר ביותר ולכן באה יחד עם סבילות נמוכה מאוד לעלייה בטמפ', בעיקר עקב ירידה ביכולת לספק מספיק חמצן על מנת לייצר ATP (Po'rtner et al. 1999).

עבודות שנעשו לאחרונה גם העלו את ההשערה כי למינים מאנטרקטיקה אין את אותו מנגנון פיזיולוגי של התגוננות מפני עקה תרמית (משפחה של חלבוניים הקרויים צ'פרונים) אשר קיים ביצורים בשאר העולם (Hofmann et al. 2005).

תוצאות אלו מעידות בבירור כי בהיעדרותה של היכולת לעבור התאמות פיזיולוגיות בטווח הקצר או האבולוציוני, ניווכח בפגיעה קשה ביותר של יצורים ימיים רבים עקב עלייה קטנה מאוד בטמפ' המים.

ישנם מחקרים המעידים כי תגובתם של מינים בודדים לשינויים אקלימיים משתנה עקב נוכחות של מינים מתחרים. לשם כך יש לבחון את השפעות ההתחממות הגלובלית מזווית ראייה רחבה של הקהילה כולה.

בסביבה היבשתית, התחממות של אזורים נקודתיים בכמה מעלות תיצור שינויים גדולים בהרכב החברה ובביומסה. ההתחממות של חצי האי האנטרקטי, גורמת להעלאת זמינותם של בתי גידול עקב חשיפה של קרקע עליה ישבו קרחונים, ואלה מעלים את פוטנציאל ההתיישרות וההפצה של מינים מסוימים. באזורים הרדודים של הסביבה הימית, תושפע תפקוד הקהילה גם עקב חשיפה מוגברת לקרינת UV-B בשל ירידה בריכוז האוזון בסטרטוספירה.

בשל מורכבות האינטראקציות בין הטמפ', כיסוי קרח, אור וקרינה קשה מאוד לחזות את הדינמיקות הצפויות של הביטה. יחד עם זאת, סביר להניח שיחול שינוי בזהותם של מיני המפתח ומכאן ינבע שינוי כללי במבנה של החברה.

עוד צפוי כי הפרעות גוברות של שינויים במבנה קרחונים ישנו את מבנה החברה הישיבה. כמות גדולה יותר של בקיעים עמוקים בקרח והמשך התמוטטות של קרחונים רק תגביר את כתמיות בית הגידול של אזור מדפי הקרח הרדודים. ישנן עבודות המצביעות כי לעוצמת תופעת הבקיעים השפעה על מגוון ואוסף המינים המרכיבים את הפאונה הישיבה, דבר המוביל לשינוי כולל של תפקוד האקוסיסטמה כולה (Barnes & Kuklinski 2004).

## מארג המזון באנטרקטיקה

המבנה הבסיסי של מארג המזון באנטרקטיקה הינו מבנה מעונף. איור 2 מראה כי מבנה מארג המזון המאפיין את אנטרקטיקה פשוט ביחס לאקוסיסטמות אחרות והינו מורכב משלוש רמות טרופיות עיקריות.

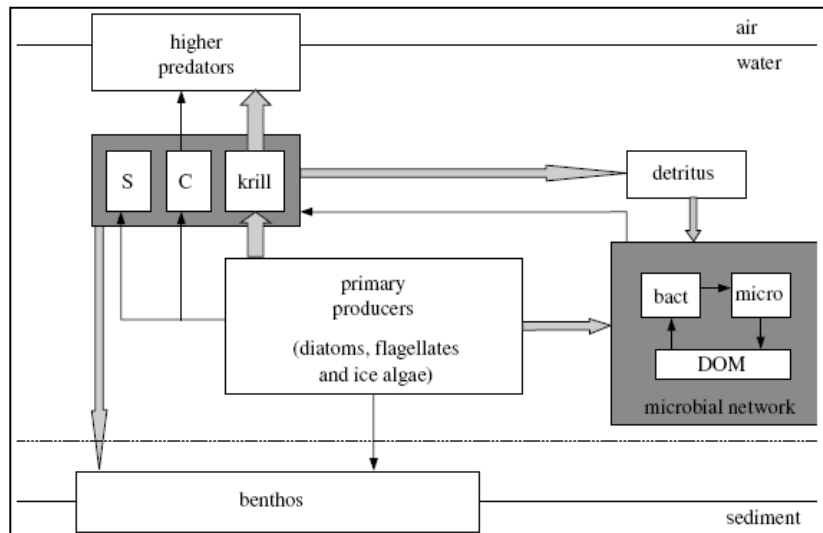
פחמן עובר קיבוע ע"י יצרנים ראשוניים ונצרך בשלושה מסלולים מתחרים עיקריים – זואופלנקטון, המעגל המיקרוביאלי ופאונה ישיבה. שלוש קבוצות אלה מהוות חוליה מקשרת ישירה לרמה הטרופית הגבוהה ביותר, כמזונם של טורפי העל (פינגווינים, אלבטרוס, כלבי ים ועוד). לא ניכרת חלוקה לתת רמות בקרב חברת הזואופלנקטון למינים בגדלים שונים הניזונות זו מזו כפי המוכר במערכות ימיות אחרות כמו למשל בצפון האוקיינוס האטלנטי (Urban et al., 1992).

החצים העבים באיור 2 מראים את מעברי האנרגיה הדומיננטיים בחצי האי האנטרקטי, כך מודגשת במיוחד חשיבותו של הקריל כמין המפתח במעבר האנרגיה באקוסיסטמה זו (Clarke et al., 2006).

מבנה מארג מזון שכזה טומן בחובו יתרון בולט באופן מעבר האנרגיה. ידוע הוא כי בממוצע רק כ-10%-20% מהאנרגיה המיוצרת ע"י רמה טרופית מסוימת עוברים לרמה שאחריה (Pauly and Christensen, 1995). ככל שתהא שרשרת המזון קצרה יותר ותכלול פחות רמות, משמעות הדבר היא כי יותר אנרגיה מומרת לביומסה של טורפי העל. המערכת האנטרקטית, על אף עושר המינים הגבוה שלה ביחס למערכות ארקטיות אחרות, נחשבת לאקוסיסטמה בעלת עושר מינים קטן ביותר ביחס למערכות אקולוגיות כמו שוניות אלמוגים טרופיות (Clarke et al., 2006).

מצד שני בולט חסרונה של מערכת שכזו, המתבססת על מספר מועט של רמות טרופיות, כאשר מידת החומרה של תוצאה עקב הפרעה קשה במערכת תלויה במין הספציפי שיפגע. כל פגיעה באוכלוסייה של מין המצוי מעל לרמת היצרנות הראשונית עלולה להוביל להכחדות משניות בעקבותיו, כאשר גם כאן מימדי התופעה תלויים בשאלה איזה מין מדובר (Clarke et al., 2006).

בחרתי להציג מחקר העוקב אחר מגמות השינוי של הקריל ב-WAP למול שינויים באוכלוסיית הסלפות, המנסה להסיק כיצד שינויים בדומיננטיות של מיני זואופלנקטון עלולים להשפיע על המערכת האנטרקטית כולה (Atkinson et al., 2004).



איור 2: המבנה הבסיסי של מארג המזון באוקיינוס הדרומי (Clarke et al., 2006).



ירידה ארוכת טווח בתפוצת הקריל האנטרקטי *E. superba* ועלייה בסלפות *Salpa*

*thompsoni* באוקיאנוס הדרומי (Atkinson et al., 2004)

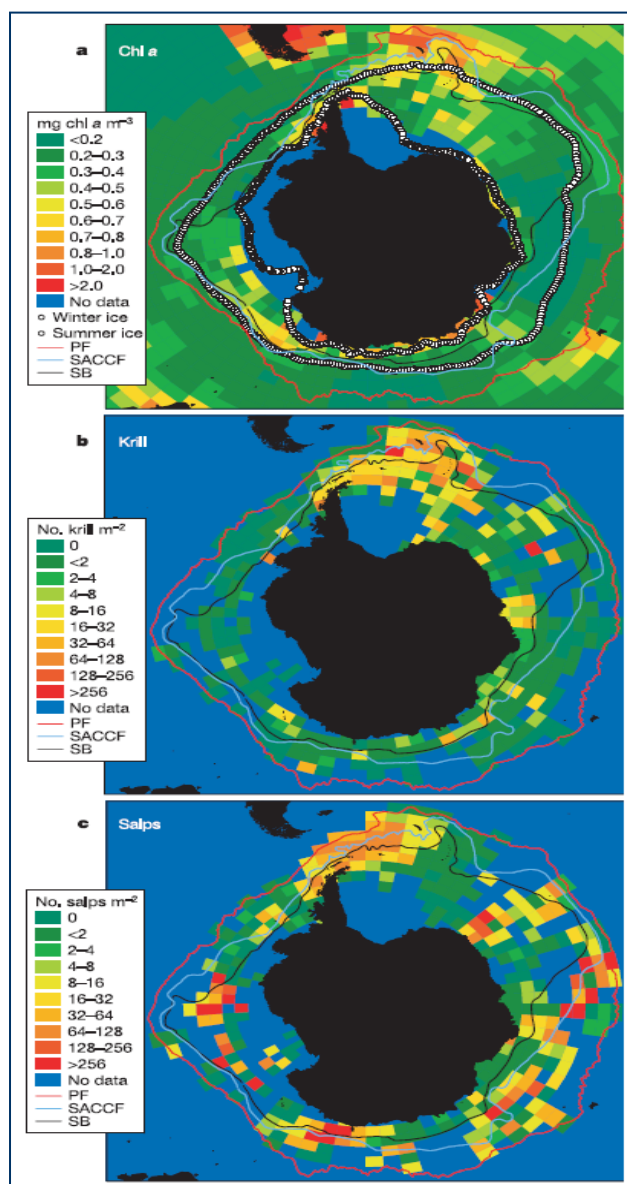
הקריל האנטרקטי והסלפות הינם, כאמור, שתי קבוצות עיקריות של צרכנים ראשוניים באוקיאנוס הדרומי.

מבחינה מרחבית ניכר כי לקריל בקיץ תפוצה כתמית בתוך בית הגידול שלו, כאשר ריכוזי אוכלוסייה גבוהים מתואמים בצורה ישירה עם שני גורמי מפתח חשובים הקשורים בשכיחות מזונם:

1. אזורי יצרנות גבוהים (המתבטאים כריכוזי כלורופיל *a* גבוהים) המייצגים את פריחות הקיץ של הפיטופלנקטון (איור *a3*, *b3*);

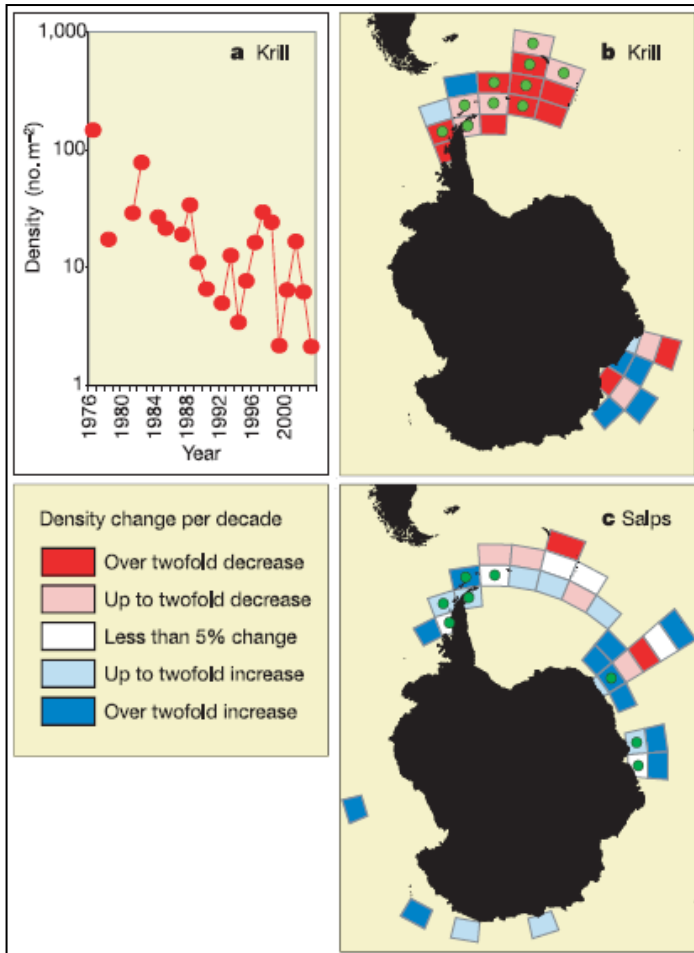
2. גודלם ואורך חייהם של קרחוני החורף הקודם. מדפי הקרח מספקים אצות קרחוניות כמקור מזון ומקום מסתור, המאפשרים גיוס לריוואלי מוצלח.

סלפות לעומת הקריל, מאכלסות אזורים חמימים יותר ובעלי ריכוזי מזון נמוכים יותר באוקיאנוס הדרומי, לכן מידת היצרנות הנמוכה ברוב חלקיו של הזרם הסובב את האנטרקטיקה מראה כי בית הגידול של הסלפות גדול הרבה יותר מזה של הקריל כאשר אין מגמה של התרכזות אוכלוסיות לאזור מסוים (איור *c3*).



מידע רב שנאסף מדיגומי רשת משנת 1926 עד שנת 1939 והשווה למידע שהתקבל מדיגומים בשנים 1976-2003 הראה כי למעלה מ-50% מהקריל מתרכז באזור חצי האי האנטרקטי. עובדה זאת מבליטה מגמת ירידה של עד פי 2 בצפיפות המין בדרום מערב האוקיינוס האטלנטי וסביב חצי האי מאז שנות ה-70 (איור *a4*). מול הירידה בריכוזי הקריל נצפתה מגמה הפוכה סביב חצי האי, של עלייה עד פי 2 בריכוזי הסלפות, שינוי בעל השפעה מכרעת על מארג המזון באזור.

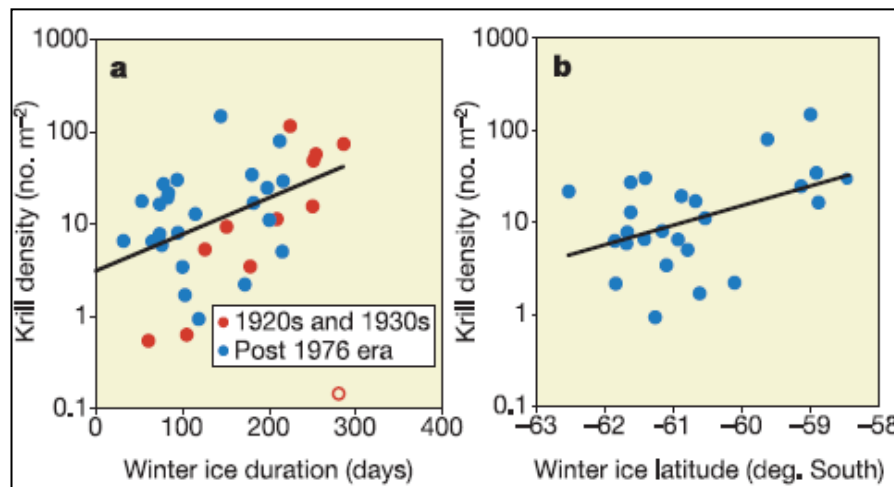
נשאלת השאלה, מה הוא אותו שינוי שהתרחש באקוסיסטמה אשר הוביל לירידה בצפיפות הקריל והאם אותו גורם תורם גם לעלייתה של אוכלוסיית הסלפות? הבקרה על אוכלוסיות הרועים נשלטת ע"י גורמים של טריפה (top-down) וגודל מאגר המזון (bottom-up).



איור 4: שינויים זמניים בתפוצת קריל וסלפות. (a) צפיפות הקריל בדרום מערב האוקיאנוס האטלנטי, שינוי בריכוזי קריל לאחר 1976, שינוי בריכוזי סלפות בשנים 1926-2003. (Atkinson et al., 2004)

במחקר זה נבחן הקשר הזמני שבין אוכלוסיית הקריל לבין פרמטר פיזיקאלי – קרחוני החורף. לשם כך נערכה השוואה בין המידע לגבי צפיפות הקריל לפי תפיסות ברשתות הדיג לבין אינדקסים של כיסוי קרחונים. הצלבה של הנתונים מראה כי קיימת התאמה חיובית בין צפיפות הקריל בעונת הקיץ לבין משך הזמן ומידת הכיסוי של הקרחונים בעונת החורף שקדמה לה (איור a5 ו-b5).

ההתאמה החיובית שניכרת בגרפים אלה לא תואם את הנראה באיור a1 ו-b. רמות גבוהות של קריל ניתן לראות גם מחוץ לאזור הכיסוי הקרחוני, כמו בדרום ג'ורג'יה (דרומית מערבית לחצי האי, תמונה 1), בעוד רמות צפיפות נמוכות תואמות מקומות בעלי כיסוי קרחוני נרחב.



איור 5: צפיפות קריל ממוצעת בדרום מערב האטלנטי כפונקציה של (a) משך זמן כיסוי קרחוני, (b) קו רוחב ממוצע בספטמבר בו מתקיימים 15% כיסוי קרחוני כמדד למידת כיסוי קרחוני (Atkinson et al., 2004)

מסקנת המחקר הייתה כי עיקר ההשפעה של כיסוי קרחוני על אוכלוסיית הקריל ברמת האגן האוקיאני כולו (כולל אזורים מצפון לאזור הכיסוי הקרחוני) היא באזורי ההשרצה והגדילה של הלוויתנים, כלומר אזור חצי האי האנטרקטי ובקשת סקוטיה הדרומית. הלוויתנים צריכים מספיק מזון על מנת להכפיל את גודלן לאורך החורף, מכאן שאספקת מזון מספקת לאורך כל השנה היא המאפיין העיקרי של דרום מערב האטלנטי המאפשר שמירה על צפיפות עדרי קריל גבוהה וכל פגיעה בכיסוי קרחוני באזורים אלה משפיעה ברמת האוכלוסייה כולה. השפעת ההתחממות הגלובלית ניכרת בעיקר במשך הזמן של עונת הקרחונים, ההולך ומתקצר. אזורי מפתח של השרצה והתפתחות לריוואלית ממוקמים באזורים הרגישים ביותר לשינויים סביבתיים בהם כבר ניכרו עלייה בטמפרטורת מי העומק וצמצום בשטחי קרחונים במספר מקומות.

הירידה במין מפתח בעל דרישות מזון גבוהות כמו הקריל מתוזמנת, כנצפה, עם עלייה של מין בעל דרישות מזון נמוכות שאינן תלויות בכיסוי הקרחוני, הסלפות. בהתחשב בעובדה כי מחזור החיים של הסלפות קצר יותר מזה של הקריל ובהינתן קצבי גדילה מהירים ביותר של האוכלוסייה יש להניח ולצפות כי לסלפות יכולת להגיב לשינויים סביבתיים בטווח זמן קצר. שינויים אלה בתפוצת מיני מפתח הם בעלי השלכות מעמיקות על מארג המזון באוקיינוס הדרומי. פינגווינים, אלבטרוס, כלבי ים ולווייתנים יכולים לבסס את תזונתם על מגוון רחב של יצורים אך נוטים להעדיף ולהגיב בקיצוניות למחסור במצבורי אוכלוסיית הקריל. הדבר הוביל למסקנה כי ייתכן והירידה בריכוזי הקריל הן היסוד לשינויים הדמוגרפיים שהתרחשו לאחר שנות ה-80 באוכלוסיית טורפי העל שנצפתה בכל דרום מערב האטלנטי.

במחקר אשר עקב אחר חמישה מיני פינגווינים אנטרקטיים שונים, נבחנה השאלה כיצד משפיעים השינויים בתנאי הסביבה ובאוכלוסיית הקריל על טורפי העל היחודיים של מהערכת האקולוגית של אנטרקטיקה.

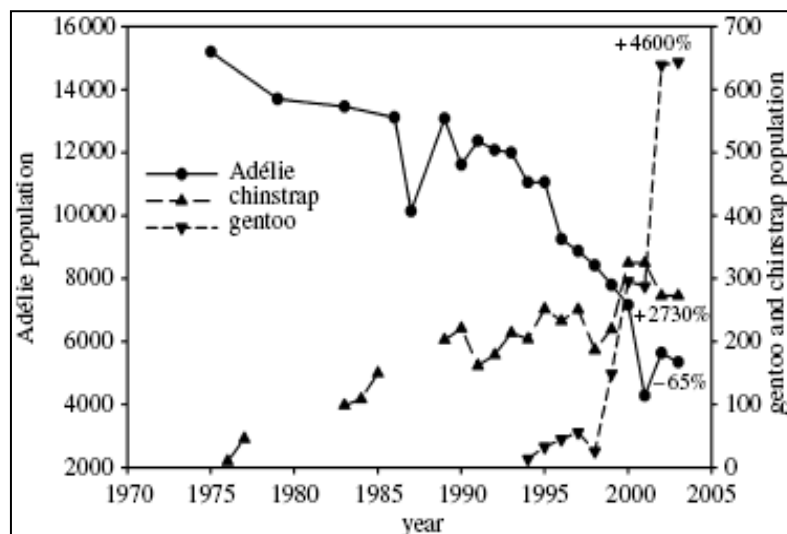
שפעת ההתחממות על טורפי על (Ducklow et al., 2006)

מערב חצי האי האנטרקטי (WAP) מהווה בית גידול לחמישה מינים מוכרים של פינגווינים. מביניהם נחשבים שניים, פינגווין קיסר *Apdenodytes forsteri* ופינגווין *edellie Pygoscelis*, כמינים אנטרקטיים "אמיתיים" בשל התלות הגבוהה שלהם בקיומם של קרחונים. שלושת המינים הנותרים, *Pygoscelis papua* (gentoo), *P. antarctica* (chinstrap) ו- *Eudyptes chrysolophus* (Macaroni), נחשבים למינים סאב-אנטרקטיים הנוטים להתחמק מקרח.

פינגווינים מהווים מרכיב חשוב מאוד בקרב צרכני העל של מקורות המזון הימיים ב-WAP, עמדה טרופית שהם מחזיקים גם בכל אזוריה של אנטרקטיקה בשל שכיחותם הגבוהה וביסוסם כעוף השולט במרביתה של ביומסת הציפורים. יחד עם זאת, שלא כמו באזורים אחרים באנטרקטיקה, במיוחד במקרה של פינגוויני *Adelie*, תזונתם מבוססת כמעט רק על מין אחד והוא הקריל האנטרקטי *E. superba* (Fraser and Hofmann, 2003).

המחקר על פינגווינים, אשר מציגים תלות שונה בקרחוני ים במעגל חייהם, סיפק עדויות ראשונות המקשרות בין השינויים הפיזיקאליים המהירים שחלים בחצי האי כתוצאה מההתחממות הגלובלית (כאשר אובדן כיסוי קרחוני מהווה סממן עיקרי לדבר) לבין התגובה הביולוגית של טורפי העל באקוסיסטמה. מחקר זה גם עזר בביסוס החשיבות בהבנה כי אסטרטגיות חיים שונות בקרב מיני הפינגווינים השונים, הן שיוצרות את מגוון התגובות הרחב של האקוסיסטמה לשינויים אקלימיים.

אחד המנגנונים בהם ההתחממות האקלימית יוצרת שינויים במבנה ובתפקוד של מערכת אקולוגית הוא ע"י הפרעה בהתפתחותן של אסטרטגיות חיים, במיוחד של מיני מפתח. אחת המגמות הבולטות שנצפתה בקרב חברת הפינגווינים הוא השינוי בהרכב המינים במהלך שלושת



איור 6: מגמות שינוי באוכלוסיות שלושה מיני פינגווינים בקרבת האי ויסיניטי בשנים 1975-2003. המספרים מייצגים אחוז שינוי משנת הדיגום

העשורים האחרונים, ככל שגודל אוכלוסיית פינגוויני *Adelie*, תלויי קרחונים, ירדה ואוכלוסיות בלתי תלויות כמו פינגוויני *chinstrap* ו- *gentoo* גדלו (איור 6).

השוואה עם עדויות פלאואקולוגיות מראה כי המתואר באיור 6, הינו מצב תקדימי כיוון ששתי האוכלוסיות, *gentoo* ו-

chinstrap לא נכחו באזור הדגימה לפחות ב-700 שנה האחרונות (Emslie et al., 1998). עובדה זו מרמזת כי תנאים סביבתיים, המעודדים שינויים דמוגרפיים אלה, חסרי תקדים בפרק זמן זה של ההיסטוריה.

על אף העובדה שהמנגנון המדויק לשינויים אלה אינו ברור, מידע ארוך טווח שנאסף על גודלה של אוכלוסיית הפינגווינים מסוג *adelie* מראה על התאמה בין מגמות אזוריות של ירידה בזמינות קרחוני החורף לבין ירידה בצפיפותה. צמצום שטחי הקרחונים תורם הן בצורה ישירה והן בצורה עקיפה לדלדול אוכלוסיית פינגוויני *adelie*.

כפי שצוין בפרק הקודם, תלותו של הקריל האנטרקטי בקרחונים כמקור מזון וכקרע אימון לשלבים הצעירים במחזור החיים של המין יוצרת מציאות בה היעלמותם של קרחונים במקומות אסטרטגיים משפיעה על אוכלוסיית הנטרפים כולה, היוצרת תגובת שרשרת ברמת האגן האוקיאני כולו.

היעלמותם של הקרחונים גם מסירה אלמנט בקרה חשוב ביחסי טורף-נטרף, כמספקי הגנה לקריל. ייתכן והעדר מקומות מסתור לאוכלוסיית הנטרפים יוצרת תנאים טובים יותר לטריפה אשר גוררים התרוקנות של "מאגרי" המזון של פינגוויני *adelie* הרבה יותר מהר, הן בשל קצבי טריפה מוגברים שלהם עצמם והן של טורפי על אחרים במערכת.

בצורה ישירה, מראות מדידות ספציפיות, כמו אלה שנעשו בתחנת פלמר (Palmer station), כי ישנו מקור יותר מקומי המייצר דינאמיקות שכאלה באוכלוסיית הפינגווינים – העלייה בכמות משקעי השלג ב-WAP. עלייה בכמות משקעי השלג יוצרת מצבורי שלג על גבי משטחי הקרח המהווים שטח רבייה למושבות הפינגווינים. מושבות אלה חוו ירידה משמעותית בגודלן במהלך שלושים השנה האחרונות, מהירה הרבה יותר מזו שחלה במושבות בהן הרוח מפזרת את מצבורי השלג.

באופן מעניין אוכלוסיות פינגוויני *gentoo* ו-*chinstrap* בתחנת פלמר, שימרו את זמני הרבייה שלהן. לפיכך, ע"י התרבות שלושה שבועות מאוחר יותר מ-*adelie*, מנצלות אוכלוסיות אלה את התמוססות השלג באביב וכך עוקפות את הבעיה. שני תהליכים אלה המתרחשים על פני סקאלות זמן ומרחב שונות יוצרים אי התאמה מרחבית ו/או זמנית בין מקורות וגורמים הכרחיים לקיום מחזור החיים של מין מסוים.

## סיכום

שינויי אקלים גלובליים ומקומיים הם הכוח המניע עבור תהליכים התפתחותיים של אקוסיסטמות, כאשר השפעה מהירה וחזקה יותר מתרחשת כאשר חל שינוי קיצוני באוכלוסיות של מיני מפתח.

באקוסיסטמה האנטרקטית, המבוססת על מארג מזון בעל מספר מועט של רמות טרופיות, הופכת חשיבותו הרבה של הקריל לנקודת חולשה בשרשרת.

מנקודת מבטו של מארג המזון מניחים כיום כי שינויים בשפע וזמינות הטרף המבוקש חייבים ליצור שינויים במצבי הסף המייצרים תנאים סביבתיים אופטימאליים עבור מין אחד מטורפי העל ופחות אופטימאליים עבור אחרים.

מרכיבי התגובה מגוונים וחולשים על טווח מאפיינים, עובדה המקשה על יצירת מודלים לחיזוי המשך השפעה של ההתחממות הגלובלית על אנטרקטיקה.

בנימה אישית אציין כי כמה הנחות יסוד, המהוות בסיס למרבית המחקרים הנערכים באנטרקטיקה, אינן בהכרח נכונות או שאין ביכולתן להסביר תופעות בכלל היבשת. אין ספק שבמהלך המאה שנה האחרונות נחזו אירועים רבים של פגיעה והכחדות מינים בכל מקום על פני הכדור, עקב פעולות של האדם. להבדיל מאירועים כמו כריתת יערות לצורכי חקלאות או ציד מוגבר של בע"ח בשל דרישות שוק תאוותן, כל אותן תופעות טבע המתרחשות באזורים בלתי מיושבים כמו אנטרקטיקה מעוררים בעייתיות כאשר מנסים להגדיר את תפקידה של ההתחממות הגלובלית בהתרחשם. עד כה לא הצליחו מדענים לקבוע אם אכן מתרחשת התחממות מואצת של כדור הארץ או שמא אנו עדים לתהליך טבעי אשר השלכותיו "קשות" למין האנושי המתייחס לעתים למושג יציבות אקולוגית כשימור סטטי על מצב קיים במקום שימור דינאמי.

אם מרחיבים את התמונה ומסתכלים מעבר ל-WAP אל חלקים אחרים באנטרקטיקה צופים בתופעות הפוכות לגמרי של התקררות בלתי מוסברת שלדעתי יש להמשיך ולחקור את השפעותיה. ייתכן וכל שאנו רואים כאן הינו חלק קטן ממחזור הנפרש על סקאלות זמן ומרחב הרבה יותר רחבות מעינו החוקרת של האדם וכל שעלינו לעשות הוא לשבת מהצד ולצפות אובייקטיבי ככל האפשר במתרחש.

## ביבליוגרפיה

- Atkinson A., Siegel V., Pakhomov E. et al. (2004). **Long-term decline in krill stock and increase in Salps within the Southern Ocean.** Nature, 432: 100-103.
- Barnes D.K.A and Kuklinski P. (2004). **Variability of competition at scales of  $10^1$ ,  $10^3$ ,  $10^5$ , and  $10^6$  m: encrusting Arctic community patterns.** Mar. Biol. 145: 361–372.
- Clarke A., Murphy E.J., Meredith M.P. et al. (2006) **Climate change and the marine ecosystem of the western Antarctic Peninsula.** Phil. Trans. R. Soc. B, 362: 149–166
- Ducklow H.W., Baker K., Martinson DG. et al. (2006). **Marine pelagic ecosystems: the West Antarctic Peninsula.** Phil. Trans. R. Soc. B, 362: 67–94.
- Emslie S.D., Fraser W.R., Smith R.C. & Walker W. (1998) **Abandoned penguin colonies and environmental change in the Palmer Station area, Anvers Island, Antarctic Peninsula.** Antarctic Sci. 10: 257–268.
- Fraser W.R. and Hofmann E.E. (2003). **A predator's perspective on causal links between climate change, physical forcing and ecosystem response.** Mar. Ecol. Prog. Ser. 265: 1–15.
- Hofmann G. E., Lund S. G., Place S. P. and Whitmer A. C. (2005). **Some like it hot, some like it cold: the heat shock response is found in New Zealand but not Antarctic notothenioid fishes.** J. Exp. Mar. Biol. Ecol. 316: 79–89.
- Pauly D. and Christensen V. (1995). **Primary production required to sustain global fisheries.** Nature, 374: 255-257.
- Pörtner H. O., Peck L. S., Zielinski S. and Conway L. Z. (1999). **Temperature and metabolism in the highly stenothermal bivalve mollusc *Limopsis marionensis* from the Weddell Sea, Antarctica.** Polar Biol. 22: 17–30.
- Ribic C.A., Chapman E., Fraser W.R. et al. (2008) **Top predators in relation to bathymetry, ice and krill during austral winter in Marguerite Bay, Antarctica.** Deep-Sea Research II, 55: 485–499.

Turner J., Colwell S. R., Marshall G. J. et al. (2005) **Antarctic climate change during the last 50 years**. Int. J. Climatol. 25: 279–294.

Urban J.L., McKenzie C.H. and Deibel D. (1992) **Seasonal differences in the content of *Oikopleura vanhoeffeni* and *Calanus finmarchicus* faecal pellets: illustrations of zooplankton food web shifts in coastal Newfoundland waters**. Mar. Ecol. Prog. Ser., 84:255-264.