

## חיזוי אקלימי לטווח ארוך – הרקע המדעי בפתרון יוסף לחלומות פרעה

### יצחק פליקס<sup>1</sup> ומיכאל גיל<sup>2</sup>

1. המחלקה למתמטיקה, המכון למחקר ביולוגי בישראל, נס ציונה
2. המחלקה למדעי האטמוספירה והאוקיינוס, המכון לגאופיסיקה, אוניברסיטת קליפורניה, לוס-אנג'לס

### מבוא

חיזוי לטווח ארוך הנו ענף מרכזי היום בחקר האקלים, שכן יש לו השפעה גדולה על תכנון כלכלי וחברתי בתחומים שונים. קיימות שתי גישות לחיזוי ארוך טווח: אחת המבוססת על פתרון משוואות המתארות את התנהגות האטמוספירה והאוקיינוסים; והשנייה מבוססת על לימוד וניצול התכונות הסטטיסטיות של מערכות האקלים. שתי גישות אלו משלימות זו את זו, ובמאמר זה נתבסס על הגישה השנייה.

תכנון ארוך טווח המתבסס על תחזית אקלימית, מופיע במקרא בתיאור של פתרון יוסף לחלומות פרעה, כפי שנאמר בספר בראשית (מא:א-לז):

"וַיְהִי, מִקֵּץ שְׁנָתַיִם יָמִים; וּפְרָעֹה חָלַם. וְהִנֵּה מִן-הַיָּאֵר, עֹלֹת שֶׁבַע פְּרוֹת.... וַיִּישָׁן, וַיַּחְלֶם שְׁנֵי; וְהִנֵּה שֶׁבַע שְׁבָלִים... וַיְהִי בְבֹקֶר, וַתִּפְעַם רוּחוֹ. וַיֵּאמֶר יוֹסֵף אֶל-פְּרָעֹה, חֲלוֹם פְּרָעֹה אֶחָד הוּא: הִנֵּה שֶׁבַע שָׁנִים, בָּאוֹת שֶׁבַע גְּדוֹל, בְּכָל-אֶרֶץ מִצְרַיִם. וְקָמוּ שֶׁבַע שָׁנֵי רָעָב, אַחֲרָיו, וְנִשְׁכַּח כָּל-הַשֶּׁבַע, בְּאֶרֶץ מִצְרַיִם; וְכָל-הָרָעָב, אֶת-הָאֶרֶץ. יַעֲשֶׂה פְּרָעֹה, וַיִּפְקֹד פְּקָדִים עַל-הָאֶרֶץ; וְחָמַשׁ אֶת-אֶרֶץ מִצְרַיִם, בְּשֶׁבַע שָׁנֵי הַשֶּׁבַע. וַיִּקְבְּצוּ, אֶת-כָּל-אֶרֶץ הַשְּׁנֵים הַטּוֹבוֹת, הַבָּאוֹת, הָאֵלֶּה; וַיִּצְבְּרוּ-בָּר תַּחַת יַד-פְּרָעֹה, אֶת כָּל-בְּעָרֵים-וְנִשְׁמְרוּ. וְהָיָה הָאֵל כָּל לְפָקְדוֹן, לְאֶרֶץ, לְשֶׁבַע שָׁנֵי הָרָעָב, אֲשֶׁר תִּהְיֶינָה בְּאֶרֶץ מִצְרַיִם; וְלֹא-תִכְרַת הָאֶרֶץ, בְּרָעָב. וַיִּיטֹב הַדָּבָר, בְּעֵינֵי פְּרָעֹה, וּבְעֵינֵי כָל-עַבְדָּיו".

מספר שאלות מתעוררות ביחס לסיפור זה, והן: מהו הרקע הריאלי שעמד לפני פרעה וגרם לו להתרגשות מהחלום? כיצד יוסף שכנע את פרעה לקבל את התחזית שלו לטווח ארוך של 14 שנים, ולשנות את סדרי הממלכה? נציין שלא מוזכר בסיפור המקראי מהי התופעה שגרמה לשובע ולאחר מכן לרעב, אבל מהסיפור עולה, שבזמן הרעב לא היה חריש וקציר במצרים (בראשית מד:ו), וגם סופו של הרעב בא לידי ביטוי על-ידי זריעה (בראשית מז:כג). התשובות לשאלות אלו ולהבנת הסיפור, מצויות בהכרה מקרוב של החיים במצרים. בעבודה זו נתאר בקצרה את התלות המוחלטת של חקלאות מצרים בגאות הנילוס, וההשלכות המדיניות הנובעות מכך. בעבודה זו מתוארות מדידות של גאות הנילוס, שהחלו לפי כ-5,000 שנה, ויבחן הרקע הפיסיקלי והסטטיסטי של הגאות והתלות שלה בתופעות אקלימיות בולטות, שסקאלת הזמן שלהן היו מספר שנים.

### חשיבות הנילוס למצרים

מלכות מצרים העתיקה החלה בשנת 3100 לפנה"ס, עם האיחוד של מצרים העליונה והתחתונה תחת שלטון מרכזי אחד. מצרים העליונה הינה האזור שמצפון לאשד הראשון (first cataract) של הנילוס, ועד לתחילת הדלתה באזור קהיר, ומצרים התחתונה כוללת את אזור הדלתה מקהיר ועד לים-התיכון, רוחבה כ-200 ק"מ ואורכה כ-400 ק"מ (Hassan, 2005). מצרים הייתה מהמדינות המתקדמות והחזקות ביותר בעולם העתיק במשך אלפי שנים. עצמתו של השלטון המרכזי באה לידי ביטוי בפרוייקטים העצומים שביצע, כמו בניית הפירמידות והמקדשים שהשתמרו עד היום במלוא פאנם.

מצרים תלויה למחייתה באופן מוחלט בנילוס, כיוון שזה מקור המים היחיד המשמעותי בכל המדבר המשתרע על צפון-מזרח אפריקה. לכן, התפתחותה הכלכלית, התרבותית, המדינית והדתית הייתה סביב הנילוס. החיים במצרים העלית מתרכזים ברצועה צרה שרוחבה קילומטרים בודדים לאורך הקניון של הנילוס, ואילו במצרים התחתית – מצפון לקהיר ועד לים – האוכלוסייה מתפרסת על השטחים הנרחבים של הדלתה. היטיב לתאר תלות זו ההיסטוריון היווני הרודוטוס כשביקר במצרים, באמרתו הידועה: "מצרים היא מתנת הנילוס".

במצרים מתחלקת השנה לשלוש עונות, בהתאם למהלך הגאות והשפל של הנילוס (איור 1): (1) בעונה הראשונה – אוגוסט-ספטמבר, הנילוס גואה ומפלס המים עולה בקהיר בכ-7 מ'. המים מציפים ומדשנים (על-ידי הסחף המכיל מלחי דישון) שטחים נרחבים. ההצפה במצרים העלית הנה לאורך הקניון של הנילוס (לרוחב של קילומטרים בודדים), ובמצרים התחתית – כל אזור הדלתה מוצף ומדושן. האזורים שמחוץ לתחום ההצפה של הנילוס הנם מדבר מוחלט, שכן הגשמים במצרים נדירים ביותר ולא ניתן לקיים חקלאות באזורים אלו; (2) בעונה השנייה – נובמבר-דצמבר, חורשים וזורעים את השדות לאחר שפני המים ירדו; (3) בעונה השלישית – ינואר-מאי, מפלס המים קרוב למינימום, קוצרים את התבואה לאחר הבשלתה (Baines, 2002).

עד למאה ה-19 לא היו ידועים מקורות הנילוס ולא הסיבה לגאות שלו. בגלל חשיבותו התרבותית והמעשית, העסיק נושא זה גאוגרפים ונוסעים רבים, מאז ימי הביניים. המצרים הקדמונים תלו את הגאות ברצון האלים, ועל-פי אמונתם הופעתו של האל האפי גרמה לגאות הנילוס, וכאשר אחר להופיע גם הגאות איחרה. כיום, כתוצאה מתגליות הגאוגרפיות של המאה ה-19, ידועים המקורות של הנילוס והם בעיקרם שניים (איור 2): (1) הנילוס הלבן, שמקבל את מימיו במשך כל השנה מהאגמים ויקטוריה ואלברט שקרובים לקו המשווה, ולכן הזרימה בנילוס הלבן די אחידה במשך כל השנה; (2) הנילוס הכחול ונהר האטברה. מקורם ברמת אתיופיה והם ניזונים מגשמי המונסון שיורדים באזור זה בחודשים יוני-ספטמבר. הזרימה בנילוס הכחול ובנהר האטברה חזקה בחודשים יולי-ספטמבר, והיא הגורמת לגאות הנילוס. בחודשים אלו זורמת בנילוס כ-90% מכמות המים השנתית. לאחר תום תקופת המונסונים, כמות המים ביובלים הללו מתמעטת מאוד, והגובה המינימלי של מי הנילוס מתקבל בכל שנה בחודשים ינואר-מרץ (איור 1). מינימום זה נקבע על-פי עצמת הזרימה בנילוס הלבן שכן בחודש זה הזרימה בנילוס הכחול זניחה (Said, 1993). הנילוס הלבן והנילוס הכחול מתאחדים לנהר אחד, הנילוס, ליד העיר חרטום בסודן.

## הרעב במצרים

הסיפור בתורה על חלומות פרעה ופתרונו של יוסף על רעב ממושך, מתאר את אחת הבעיות המרכזיות שהעסיקה את מלכי מצרים, החל מהשושלת הראשונה ועד לבניית סכר אסואן הראשון ב-1902. הרעב במצרים הנו תוצאה ישירה של גאות נמוכה בנילוס. מפלס מים נמוך אינו מאפשר להוביל את מי הנילוס בתעלות ההשקיה לשטחים המצויים מעל מפלס זה, ולכן לא ניתן לעבד שטחים נרחבים. כאשר הגאות הייתה נמוכה במיוחד, ונמשכה מספר שנים, שרר רעב כבד במצרים. בשנים אלו הממלכה נחלשה והייתה פגיעה להתקפות אויבים מבחוץ, ובמקרים קיצוניים השלטון התחלף. דוגמאות קיצוניות כאלו הן, התמוטטות הממלכה העתיקה בשנת 2185 לפנה"ס, וכיבוש מצרים על-ידי הפטמידים בשנת 969 לספירה. עדויות רבות לרעב כבד כתוצאה ממפלס נמוך של גאות הנילוס, שהביא לתמורות חברתיות

ומדיניות במצרים ניתן למצוא אצל סעיד (Said, 1993). תיאור של רעב ממושך מצוי בכתובת של "אבן הרעב" (Famine Stele; איור 3). אבן זו מצויה באי סהיל (Sehel Island) ומיוחסת למלך דוסר (Djoser), המלך השני בשושלת השלישית של הממלכה העתיקה, בשנים 2667-2686 לפנה"ס), אך כנראה נכתבה על-ידי Ptolemy V Epiphanes (מלך במצרים בין השנים 181-205 לפנה"ס, שניסה להדמות למלך דוסר). בכתובת מסופר על רעב כבד ששרר במצרים במשך שבע שנים כתוצאה ממפלט נמוך של הנילוס, כך שלא ניתן היה להשקות את השדות. רעב זה הביא את העם לידי ייאוש. למלך דוסר נגלה בחלום האל קנום (Khnum), בורא העולם, ובישר לו שאם יתפלל וירצה את האל יבוא סוף לרעב, ותחל תקופה של שנות שובע גדול למצרים.

מלכי מצרים חיפשו פתרונות לבעית הרעב, בעיקר לאחר הלקח שנלמד מהתמוטטות הממלכה העתיקה. פתרונות אלו התבססו על מדידת גובה גאות הנילוס או על אגירת מי הנילוס בשקע פיום (Hassan, 2005). למדידת גובה הגאות הייתה מטרה כפולה: קביעת גובה המסים, וניהול חכם של משק המים. גובה המסים בכל שנה נקבע בהתאם ליבולים, ורמת היבולים הייתה תלויה בגובה גאות הנילוס. ניהול משק המים במצרים היה אחד הסודות השמורים, ומטרתו הייתה להמעיט ככל האפשר את נזקי הבצורת כתוצאה ממפלט נמוך של הנילוס. הניהול היה נתון במצרים העתיקה בידי החרטומים, ואחר-כך בידי הקופטים. רק 120 שנה לאחר הכיבוש הערבי, עבר הניהול מהקופטים למוסלמים, זאת לאחר שמדעניהם למדו את הנושא שכלל בין היתר נתונים על מפלט הנילוס (Popper, 1951).

### מדידות של גובה המים בנילוס

המצרים החלו במדידות של מפלט המים בנילוס כבר לפני כחמשת אלפים שנה. על "אבן פלרמו" (the Palmero Stone) מלפני כ-4,500 שנה (האבן מצויה כיום במוזיאון בפלרמו באיטליה), חרותה אינפורמציה רבה על מלכי מצרים, ונתונים על גובה גאות הנילוס בתקופה שארכה כ-700 שנים (2400-3100 לפנה"ס). מד הגובה של מפלט הנילוס נקרא בשמו היווני נילומטר (Nilometer). הנילומטרים הפשוטים הראשונים היו למעשה סימון של גובה מפלט המים המכסימלי על הסלעים שבגדות הנילוס. מד אחר היה מורכב מסדרת מדרגות ושנתות על גדת הנהר, וגובה מפלט המים נקבע על-פיהן. במקרה זה הסקאלה הייתה קבועה ושרירותית, ולכן המדידה לא הייתה מדויקת. המד המדויק ביותר היה באר, שאליה הובלו מי הנילוס וגובה המפלט סומן על קירות הבאר או על עמוד שנבנה במרכז הבאר (איור 4; Shahin, 1985). לאורך הנילוס, מהאשד הראשון בדרום ועד לקהיר בצפון, מצויים נילומטרים רבים. בגלל חשיבותו, שימש הנילומטר מוטיב קישוטי במספר פסיפסים באזור הים-התיכון. לדוגמה, בפסיפס "חג הנילוס" (איור 5), מתואר אדם עומד על גבו של אדם אחר (כנראה אישה) ומפסל את האותיות IZ (=יז), שמציינות את גובה גאות הנילוס – 17 אמות. כאשר הנילוס הגיע לגובה זה, היו פותחים את תעלות ההשקיה להצפת השדות. היה זה סימן לתחילת "חג הנילוס" במצרים.

כיום ידועה סדרת מדידות של המינימום והמכסימום השנתיים של מי הנילוס, בין השנים 1922-622 לספירה (איור 6). המדידות נאספו על-ידי הנסיך המצרי Toussoun (1925), ותוקנו על-ידי Popper (1951). נתונים נוספים מופיעים בספרים של Ghaleb (1951) ו-Hurst (1952). התיקונים לסדרה כוללים שינויים באורך האמה (יחידת המדידה שהשתמשו למדידת מפלט הנילוס) במשך 1,300 שנות המדידה; שינויים בעומק הקרקעית של הנילוס כתוצאה משקיעת סחף; ותיקונים בתאריך הנובעים מההבדלים בין שנת הירח (שעליה מושתת הלוח המוסלמי, ולכן גם התיארוך של סדרת המדידות לשנת

החמה הנמצא בשימוש מדעי בימינו). המדידות שבסדרה זו הנם מהנילומטר שנמצא באי רודה ליד קהיר.

### חקר האקלים לאור ניתוח מדידות הנילוס

חוקרים רבים נתחו את סדרת המדידות וחישובו את הספקטרום שלה; סיכום העבודות עד 1993 מצוי אצל סעיד (Said, 1993), ובשנים 1993-2005 אצל: Kondrashov et al., 2005 (להלן KFG). רוב החוקרים התמקדו בניתוח הסדרה בין השנים 622-1470 לספירה, כיוון שבתקופה זאת חסרות מעט מדידות. מאידך, בין השנים 1480-1922 לספירה, חסרים נתונים רבים ולכן לא ניתן לבצע אנליזה ספקטרלית בקטע זה של המדידות. KFG (2005) השתמשו בשיטה ספקטרלית מתקדמת להשלמת הקטעים החסרים בסדרות המינימום והמכסימום, וניתחו את הסדרות במשך כל 1,300 השנים (Ghil et al., 2006; Kondrashov & Ghil, 2002). הסדרות שהם ניתחו היו: סדרת המינימום וסדרת המכסימום, וסדרת הפרשים בין המינימום והמכסימום. סדרת הפרשים מייצגת את התרומה של הנילוס הכחול לזרימה בקיץ. לכל סדרת מדידות של משתנה מהטבע יש מרכיבים "חלקים" ומרכיבים "רועשים". הניתוח של Hurst (1952) ושל Mandelbrot (1982), מתרכז בחלק הרועש. KFG (2005), כמו חוקרים לפניהם (De Putter et al., 1998; Quinn, 1992), התרכזו במרכיבים החלקים, שיכולים להצביע על הגורמים הפיסיקליים. המרכיבים הללו כוללים בעיקר תנודות כמו זו שמתוארת באיור 7. תנודה כזאת מאופיינת על-ידי זמן המחזור, האמפליטודה והפאזה (הפאזה נותנת את העיתוי של נקודות הקיצון – מכסימום או מינימום).

בניתוח של KFG (2005) התקבלו מספר תנודות שזמן המחזור שלהן הוא: 2.2, 4.2, 12, 19, 64 ו-256 שנים, וכן התקבלו מספר תנודות שזמן המחזור שלהן הוא: 2.2, 4.2, 12, 19, 64 ו-256 שנים. מקור התנודות הקצרות, 2.2 ו-4.2 שנים, הוא ב-El-Nino/Southern Oscillation (ENSO) (Quinn, 1992), מקור התנודות הארוכות של 64 ו-256 שנים, הוא כנראה בתופעות שמימיות (De Putter et al., 1998). בנוסף לתנודות ידועות אלה, קבלו KFG (2005) תנודה חדשה בסדרת המכסימום ובסדרת הפרשים, שזמן המחזור שלה הוא 7 שנים (שחזור של תנודה זו מובא באיור 8). האמפליטודה של התנודה משתנה באופן משמעותי במשך פרק הזמן הנדון, והם מציינים שינויים אקלימיים מרחיקי לכת. בולט במיוחד הגידול באמפליטודה בסביבות שנת 950 לספירה, וההקטנה שלה בשנת 1450 לספירה, המציינים שינויים אקלימיים מהירים. תקופה חמה זו צוינה בתחילת ובסוף התקופה החמה של ימי הביניים באירופה, למשל, על-ידי התיישבות הוויקינגים בגרילנד. KFG (2005) שיערו שתנודה זאת נגרמת על-ידי התנודה של צפון האוקיינוס האטלנטי – North Atlantic Oscillation (NAO), שלה יש מרכיב ספקטרלי שזמן המחזור שלו 7 שנים. בתנודות רב שנתיות אחרות הידועות באקלים של כדור-הארץ (Ghil et al., 2002), לא נמצאו מרכיבים ספקטרליים של 7 שנים.

### מקור התנודה השבע-שנתית

התנודה השבע-שנתית בולטת בסדרת המכסימום ובסדרת הפרשים, ולכן אנו מסיקים שהנילוס הכחול ונהר האטברה הם המקור לתנודה זאת, שכן בקיץ כ-90% מהמים בנילוס מקורם בנהרות אלו. המקור למי הנילוס הכחול ונהר האטברה הם גשמי המונסון ברמת אתיופיה, בחודשים יוני-ספטמבר. הגשמים ברמת אתיופיה הם תוצאה של הלחות המוסעת אל הרמה משלושה מקורות, שניתן לעמוד עליהם על-פי

מסלולי ההסעה של הלחות, והם מובאים באיור 9. המסלול הקצר ביותר תחילתו באוקיינוס ההודי (מס' 1 באיור 9), כאשר האוויר הלח המוסע על-ידי זרם סומלי פוגש את רכס הרי אתיופיה – הוא עולה, מתקרר, מתעבה ויורד גשם. עיקר הגשמים ממקור זה הם בצד המזרחי של רמת אתיופיה, ומעט באגן הניקוז של הנילוס הכחול, כך שתרומתו של מקור זה קטנה יחסית. התרומה הזאת נשלטת על-ידי המונסון ההודי, שמושפע רבות על-ידי ENSO. זהו המקור של התנודות הקצרות בסדרות הנדונות כאן (Quinn, 1992), שכן מחזורים של 2.2 ושל 4-5 שנים ידועים ביותר בתופעות הקשורות ל-ENSO (Ghil et al., 2002).

תחילת המסלול השני באזורים הטרופיים של דרום האוקיינוס האטלנטי קרוב לקו המשווה (מס' 2 באיור 9). הלחות מוסעת בשכבות הנמוכות של האטמוספירה (מתחת ל-3 ק"מ), על-ידי הזרימה המערבית-צפונית-מערבית עד לאזור המפגש עם הזרימה הצפונית-מזרחית של רוחות הסחר (winds trade). אזור המפגש נקרא Inter Tropical Convergence Zone (ITCZ). באזור המפגש האוויר הלח עולה לשכבות הגבוהות, מתקרר, מתעבה ומוריד גשם. בקיץ, ה-ITCZ נע צפונה עד לקו רוחב  $15-20^{\circ}N$ , דהיינו, עד לרמת אתיופיה. תחילת המסלול השלישי, תחילתו בצפון האוקיינוס האטלנטי ובים-התיכון (מס' 3 באיור 9), משם האוויר הלח מוסע על-ידי הרוחות בשכבות הנמוכות של האטמוספירה לדרום-מזרח, דרך הים האדום לרמת אתיופיה. כשהאוויר הלח פוגש בהרי אתיופיה, הוא מתרומם לגבהים שמעל 3,000 מ', ומוסע לצפון-מערב על-ידי הזרם הטרופי המזרחי אל מעל לרמת אתיופיה. בעליית האוויר מעל לרמה, הוא מתקרר, מתעבה, ומוריד גשמים באגן ההקוות של הנילוס הכחול והאטברה. מסלול זה בולט במפות של שטף הלחות, והוא קיים רק בתקופת הקיץ (James, 1995, 250; Mariotti et al., 2002; Mohamed et al., 2005). אנו משערים שהתנודה השבע-שנתית של הנילוס הנה תוצאה של הסעת הלחות במסלול זה, שכן ל-NAO השפעה על האקלים בצפון האוקיינוס האטלנטי ובים-התיכון. כדי לעמוד על הקשר בין התנודה השבע-שנתית של צפון האוקיינוס האטלנטי וזו של הנילוס, נאתר תחילה את ה-NAO, לו השפעה משמעותית על האקלים באירופה, בצפון-מזרח אמריקה ובמדינות הים-התיכון (Hurrell, 1995; 1996). לתנודה שתי פאזות בולטות (איור 10): בפאזה הראשונה הלחץ באיים האזוריים (מסומן ב-H) גבוה מהמוצע, ובאיסלנד (מסומן ב-L) הלחץ נמוך מהמוצע. הפרש הלחצים בגובה-פני-הים, בין האיים האזוריים לאיסלנד נקרא האינדקס של ה-NAOI (NAOI). מקובל להחסיר מאינדקס זה את ערכו הממוצע, כך שערכים גבוהים מן הרגיל של הפרש הלחצים מתאימים לאינדקס חיובי, וערכים נמוכים מן הרגיל – לאינדקס שלילי. כאשר אינדקס זה חיובי, הוא גורם לזרימת אוויר מהאוקיינוס האטלנטי לצפון-אירופה. הסעת האוויר הימי החם והלח מהאוקיינוס האטלנטי לצפון-אירופה, גורם להגברת הגשמים ולטמפרטורות גבוהות מהמוצע בחורף. בשנים אלו סובלות מדינות דרום-אירופה והים-התיכון ממיעוט גשמים ובצורות. בפאזה השנייה הלחץ באיים האזוריים נמוך מהמוצע ובאיסלנד גבוה מהמוצע (איור 10ב), כך שהאינדקס שלילי ומצב זה גורם לזרימת אוויר מהאוקיינוס האטלנטי לדרום-אירופה וליים-התיכון. הסעת האוויר הימי החם והלח מהאוקיינוס האטלנטי לדרום-אירופה וליים-התיכון, גורמת להגברת הגשמים ולטמפרטורות גבוהות מהמוצע בחורף. בצפון-אירופה הגשמים מועטים והטמפרטורות נמוכות מהמוצע. קיימות מדידות של הממוצע החודשי של NAOI, החל משנת 1825<sup>1</sup>. בחינת הקשר בין ה-NAOI והנילוס מתבצעת על-ידי בחינת הקשר בין סדרת הזמן של ה-NAOI וסדרת הזמן של גובה המכסימום של הנילוס בין השנים 1825-1922 (בפרק זמן זה שתי הסדרות חופפות). כדי למצוא את המחזורים המשותפים לשתי

הסדרות, השתמשנו באנליזה ספקטרלית רבת משתנים ( Multi chanel Singular Spectrum ) (Ghil et al., 2002; MSSA – Analysis) . רוחב חלון הזמן שנלקח לאנליזה זו היה 40 שנה. שני המרכיבים העצמיים הראשונים נותנים את המגמה, וסקאלת הזמן של השינויים במרכיבים אלו גדולה מ-40 שנה. זוג המרכיבים הבא נותנים את התנודה השבע-שנתית. רמת הוודאות הסטטיסטית של תוצאות אלו היא של 95%. שחזור של התנודה בכל אחת מהסדרות מובא באיור 11. מהנתונים עולה שקיים הפרש פאזה של חצי מחזור (3.5 שנים) בין שתי הסדרות, דהיינו, כאשר ה-NAOI שלילי אזי גאות הנילוס גבוהה, וכאשר האינדקס חיובי גאות הנילוס נמוכה. תוצאה זו מתאימה לשתי הפאזות של התנודה של ה-MAO שתוארה לעיל. כאשר האינדקס שלילי אזי יותר לחות מוסעת מהאוקיינוס האטלנטי לים-התיכון (איור 10ב), ומשם מעל צפון-מזרח אפריקה לרמת אתיופיה (מסלול 3 באיור 9). כתוצאה מכך כמות הגשמים והזרימה בנילוס הכחול גדלה והגאות בנילוס גבוהה. בשנים בהן האינדקס חיובי, פחות לחות מוסעת מהאוקיינוס האטלנטי לים-התיכון (איור 10א), ומשם לצפון-מזרח אפריקה ולרמת אתיופיה. כתוצאה מכך כמות הגשמים והזרימה בנילוס הכחול קטנה והגאות בנילוס נמוכה. מניתוח זה ניתן להסיק כי ל-NAO יש השפעה על הגשמים ברמת אתיופיה, ולכן תחזית ארוכת טווח של כמות המים הצפויה בנילוס צריכה להביא בחשבון השפעה זו.

## סיכום

הסיפור המבוא בספר בראשית על חלומות פרעה והפתרון של יוסף, הנו דוגמה לתחזית ארוכת טווח שממנה נגזר תכנון וביצוע כלכלי ומדיני ארוך טווח. השאלה המרכזית שעולה מסיפור זה היא מה הסיבה שפרעה קיבל את תחזיתו ארוכת הטווח של יוסף ושינה את סדרי הממלכה. תשובתנו מתבססת על ממצאים ארכאולוגיים ועדויות היסטוריות, לפיהן הרעב העסיק את הממלכה המצרית למעלה מ-5,000 שנה. הרעב היה תוצאה ישירה של גאות נמוכה של הנילוס, וכתוצאה מכך לא ניתן היה להשקות חלק ניכר מהשדות ולכן פחתו והיבולים. בשנים בהן הגאות הייתה נמוכה במיוחד, שרר רעב כבד במצרים, הממלכה המצרית נחלשה, ולא פעם התחלף השלטון במצרים כתוצאה מרעב ממושך. מדידות של גובה גאות הנילוס על-ידי נילומטרים החלו לפני למעלה מ-5,000 שנה, ומטרתן הייתה לקבוע את גובה המסים ותכנון נכון של משק המים.

ניתוח המדידות של גובה גאות הנילוס, מראה תנודות של שנים ועשרות שנים בגובה גאות הנילוס, כאשר אחת התנודות הבולטות הנה בת מחזור של 7 שנים. תנודות אלו גרמו לגאות גבוהה, שנמשכת מספר שנים, ולאחריה גאות נמוכה שנמשכת מספר שנים. יוסף ופרעה כנראה הכירו תופעה זאת, שכן היו ידועות להם מדידות שהחלו כ-1,200 שנה לפני זמננו. יש להניח שטובי המלומדים של התקופה (החרטומים?) הקדישו זמן רב לניתוח המדידות, עקב התלות המוחלטת של מצרים בגאות הנילוס. אמנם לא עמדו לרשותם נתונים להפרדה בין המרכיבים החלקיים של סדרות המדידות שעומדים כיום לרשותנו. יש לשער שבתקופתם היה ההפרש בין שתי הפאזות הקיצוניות של ה-NAO גדול במיוחד, ושהתנודה בת שבע השנים הייתה בולטת במיוחד, ולכן קיבל פרעה את תחזיתו של יוסף. התכנית הכלכלית, המדינית והחברתית ארוכת הטווח, שהציע יוסף, איפשרה למצרים להתקיים גם בתקופות רעב ממושכות.

כדי שניתן יהיה לתת תחזית ארוכת טווח של השינויים בכמות המים הזורמת בנילוס, יש להבין את הגורמים לתנודות השונות. בעבודה זו אנו מראים שלתנודה של צפון האוקיינוס האטלנטי יש השפעה

משמעותית על משטר הגשמים בקיץ ברמת אתיופיה, כפי שבא לידי ביטוי בתנודה השבע-שנתית בגאות הנילוס. ההשפעה של ה-NAO על הגשמים ברמת אתיופיה הנה תוצאה מהסעת אוויר ימי לח, מצפון האוקיינוס האטלנטי ומהים-התיכון, דרך הים-האדום אל רמת אתיופיה. הפאזה ההפוכה בין התנודה השבע-שנתית של האוקיינוס האטלנטי, ובין התנודה השבע-שנתית של גאות הנילוס, מוסברת על-ידי שתי הפאזות המנוגדות של ה-NAO. דהיינו, כאשר האינדקס שלילי אזי כמות הלחות המוסעת מהאוקיינוס האטלנטי לים-התיכון והלאה לרמת אתיופיה מוגברת, וכתוצאה מכך גאות הנילוס גבוהה ולהיפך כאשר האינדקס חיובי. מעבודתנו עולה שתחזית ארוכת טווח של הזרימה בנילוס וההשלכות הנגזרות ממנה לגבי ניצול המים על-ידי המדינות באפריקה הקשורות עם הנילוס ומקורותיו, צריכה להעזר גם בנתונים הקיימים על התנודה של צפון האוקיינוס האטלנטי.

### הבעת תודה

לאורנה פליקס על עזרתה ועצותיה הטובות. נתונים דיגיטליים של הנילוס התקבלו מ-Thierry de Putter ומ-Don Percival.

### רשימת מקורות

Baines J., 2002;

*BBC History, The Story of the Nile.*

[http://www.bbc.co.uk/history/ancient/egyptians/nile\\_01.shtml](http://www.bbc.co.uk/history/ancient/egyptians/nile_01.shtml)

De Putter T., Loutre M.F. & Wansard, G. 1988;

Decadal Periodicities of Nile River Historical Discharge (A.D. 622-1470) and Climatic Implications, *Geophys. Res. Lett.*, 25, pp, 3193-3196.

Ghaleb K.O., 1951;

"Le Mikyas ou Nilometer de lile de Rodah", *Mem. Inst, Egypte*, 54.

Ghil M., et al., 2002;

"Advanced Spectral Methods for Climatic time Series", *Rev. Geophys.*, 40(1), p. 1003, doi:10.1029/2000RG000092.

Hassan F.A., 2005;

"A River Runs Through Egypt: Nile Floods and Civilization", *Geotimes Magazine*, April, pp.

\_\_\_\_\_.

Hurrell J.W., 1995;

"Decadal Trends in the North Atlantic Oscillation: Regional Temperatures and Precipitation", *Science*, 269, pp. 676-679.

Hurrell J.W., 1996;

"Influence of Variations in Extratropical Wintertime Teleconnections on Northern Hemisphere Temperature", *Geophys. Res. Lett.*, 23, pp. 665-668.

Hurst H.E., 1952;

*The Nile*, Constable, London.

James I.N., 1995;

*Introduction to Circulating Atmosphere*, Cambridge University Press, Cambridge.

Kondrashov D., Feliks Y. & Ghil M., 2005;

"Oscillatory Modes of Extended Nile River records (A.D. 622-1922)", *Geophys.*

*Res. Lett.*, 32, L1072,

doi: 10.1029/2004GL022156.

Kondrashov D. & Ghil M., 2006;

"Spatio-Temporal Filling of Missing Points in Geophysical Data Sets", *Nonl. Proc. Geophys.*,

13, pp. 151-159.

Mandelbrot B., 1982;

*The Fractal Geometry of Nature*, W.H. Freeman, San Francisco.

Mariotti A. & Struglia M.V., 2002;

"The Hydrological Cycle in the Mediterranean Region and Implications for the Water Budget of the Mediterranean Sea", *J. Climate*, 15, pp. 1674-1690.

Mohamed Y.A., van Den Hurk B.J.J., G. Savenije H.H. & Bastiaanssen W.G.M., 2005;

"Hydroclimatology of the Nile: Results from a Regional Climate Model", *Hydrology & Earth System Sci.*, 9, pp. 263-278.

Popper W., 1951;

*The Cairo Nilometer*, University of California Press, Berkeley.

Quinn W.H., 1992;

"A study of Southern Oscillation-Related Climatic Activity for A.D. 622-1900 Incorporating Nile River Flood Data", in: H.F. Diaz & V. Markgraf (eds.), *El Nino: Historical and Paleoclimatic Aspects of the Southern Oscillation*, Cambridge University Press, New York, pp. 119-149.

Said R., 1993;

*The River Nile: Geology Hydrology and Utilization*, Elsevier, New York.

Shahin M., 1985;

*Hydrology of the Nile Basin*, Elsevier.

Shaw I., 2000;

*The Oxford History of Ancient Egypt*, University Press, Oxford.

Toussoun O., 1925;

"Memoire sur l'histoire du Nil", *Mem, Inst. Egypte*, 18, pp. 366-404.

הערות

[ftp://ftp.ncdc.noaa.gov/pub/data/paleo/contributions\\_by\\_author/jones2001](ftp://ftp.ncdc.noaa.gov/pub/data/paleo/contributions_by_author/jones2001) .1



## רשימת איורים

- איור 1: כמות המים הממוצעת הזורמת בנילוס בחרטום, במהלך חודשי השנה  
מקור:
- איור 2: אגן ההיקוות של הנילוס. הנילוס הלבן יוצא מאגם ויקטוריה בקו המשווה. מקורו של הנילוס הכחול  
בגשמים ברמת אתיופיה, בגובה 2,200 מ'  
מקור: [http://www.fas.usda.gov/pecad/highlights/2005/09/uganda\\_26sep2005/images/nile\\_basin.htm](http://www.fas.usda.gov/pecad/highlights/2005/09/uganda_26sep2005/images/nile_basin.htm)
- איור 3: אבן הרעב (Stela of Famine), באי סהיל באשד הראשון  
מקור: <http://touregypt.net/Featurestories/picture04082005.htm>
- איור 4: נילומטר משוכלל ומדויק הנמצא בקהיר  
צולם על-ידי: Mike Hughes, 2004  
[/http://ecrc.geog.ucl.ac.uk/qarun](http://ecrc.geog.ucl.ac.uk/qarun)
- איור 5: פסיפס "חג הנילוס" מהמאה החמישית מהעיר ציפורי, שהייתה בירת הגליל בין המאה הראשונה למאה  
הרביעית לספירה  
צילום: יגאל פליקס, 2005
- איור 6: הסטייה מהממוצע של המכסימום (קו אדום) ושל המינימום (קו שחור) של גובה המים בנילוס במטרים.  
הממוצע של המכסימום הוא 9.07 מ' ושל המינימום 2.28 מ'.
- איור 7: הקו הירוק (רציף) והכחול (מקווקו) מציינים תנודות. זמן המחזור של התנודה מצוין בקו האדום ומודד  
את הזמן בין שתי נקודות מינימום או מכסימום סמוכות.
- איור 8: שחזור התנודה השבע-שנתית. ציור עליון - סדרת המכסימום, ציור תחתון - סדרת הפרשים מכסימום-  
מינימום, המייצגת את הזרימה של הנילוס הכחול (KFG, 2005).
- איור 9: מסלולי הסעת הלחות לרמת אתיופיה
- איור 10: הפאזה הראשונה והפאזה השנייה בתנודה של צפון האוקיינוס האטלנטי, NAO  
מקור: <http://www.ideo.columbia.edu/NAO>
- א. הפאזה הראשונה – האינדקס חיובי  
ב. הפאזה השנייה – האינדקס שלילי
- איור 11: שחזור של התנודה השבע-שנתית. קו רציף - האינדקס של ה-NAO, קו מקווקו - גובה גאות הנילוס.