

חיזוי אקלימי לטווח ארוך והרקע המדעי בפתרון יוסף לחלומות פרעה

Long range forecasting and the scientific background in Joseph's interpretation to Pharaoh dreams

יצחק פליקס¹ ומיכאל גיל²

Department of Atmospheric and Oceanic Sciences and Institute of Geophysics and Planetary Physics, University of California, Los Angeles, CA 90095-1565

תקציר

חיזוי לטווח ארוך הנו ענף מרכזי היום בחקר האקלים, שכן יש לו השפעה גדולה בתכנון כלכלי וחברתי בתחומים שונים. קיימות שתי גישות לחיזוי ארוך טווח: אחת מבוססת על פתרון המשוואות המתארות את התנהגות האטמוספירה והאוקיינוסים, והשנייה מבוססת על לימוד וניצול התכונות הסטטיסטיות של מערכות האקלים.

תכנון ארוך טווח כתוצאה מתחזית אקלימית אנו מוצאים בפתרון יוסף לחלום פרעה. יוסף נתן תחזית של שבע שנות רעב ולאחריהן שבע שנות רעב. לאור תחזית זו יוסף מציע לפרעה תכנון ארוך טווח של ניהול משק המזון במצרים. לא ברור מהסיפור מדוע פרעה קיבל את התחזית של יוסף ומינה אותו להוציא את תוכניתו לפועל. תשובתנו מתבססת על כך שמצרים שתלויה בקיומה בנילוס ובכך חשופה לתקופות ארוכות של שנות רעב כתוצאה ממפלס נמוך של הנילוס שלא אפשר להשקות חלק ניכר מהשדות. בתקופות הרעב נחלשה הממלכה המצרית ולעיתים השלטון התחלף כמו הסוף של הממלכה העתיקה ב-BC 2185. המצרים מדדו את גובה גאות הנילוס לפחות 5000 שנה באמצעים שונים שהמשוכלל שבהם היה הנילומטר, אב טיפוס של נילומטר משמש כמוטיב קישוטי בפסיפסים כמו ב"הגיגות הנילוס" בציפורי. מטרת המדידות הייתה כפולה: קביעת גובה מס מחד וניהול חכם של משק המים כדי לצמצם את נזקי הבצורת מאידך. ניתוח מדידות של גובה המכסימום והמינימום השנתי של הנילוס בין השנים, 1922-AD 622 מראה תנודות של שנים אחדות בגובה הנילוס, כאשר הבולטת שבהם הנה שבע שנים. אנו

¹ כתובת קבועה: המחלקה למתמטיקה, המכון למחקר ביולוגי בישראל- ת.ד. 19 נס ציונה 70450, feliks@iibr.gov.il
² Additional affiliation: Department Terre-Atmosphere-Ocean, Ecole Normale Supérieure, and Laboratoire de Meteorologie Dynamique, IPSL, Paris, France

משערים שתנודה זו מקורה בתנודה של צפון האוקיינוס האטלנטי ולה השפעה ניכרת על האקלים באירופה, צפון אמריקה ומזרח הים התיכון.

1. מבוא

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

תכנון ארוך טווח כתוצאה מתחזית אקלימית אנו מוצאים בפתרון יוסף לחלומות פרעה. כפי שמסופר בספר בראשית בפרשת מקץ (בראשית מ"א):

"וַיְהִי, מִקֵּץ שְׁנַתִּים יָמִים; וּפְרָעֹה חָלַם, בַּהֲנֵה מֶן-הַיָּאֵר, עֹלֹת שִׁבְעַת פָּרוֹת... הָ וַיִּישָׁן, וַיִּחְלֹם שְׁנֵית; וַהֲנֵה שִׁבְעַת שְׁבָלִים... חָ וַיְהִי בְבֹקֶר, וַתִּפְּעֶם רוּחוֹ".

"וַיֹּאמֶר יוֹסֵף אֶל-פְּרָעֹה, חֲלוֹם פְּרָעֹה אֶחָד הוּא: כִּטְ הֵנָּה שִׁבְעַת שָׁנִים, בָּאוֹת שִׁבְעַת גְּדוֹל, בְּכָל-אֶרֶץ מִצְרָיִם. לֹ וְקָמוּ שִׁבְעַת שָׁנֵי רָעָב, אַחֲרֵיהֶן, וְנִשְׁפַח כָּל-הַשָּׂדֶה, בְּאֶרֶץ מִצְרָיִם; וְכָל־הָרְעָב, אֶת-הָאֶרֶץ. לֹ יַעֲשֶׂה פְרָעֹה, וַיִּפְקֹד פְּקָדִים עַל-הָאֶרֶץ; וַחֲמֹשׁ אֶת-אֶרֶץ מִצְרָיִם, בְּשִׁבְעַת שָׁנֵי הַשָּׂדֶה. לֹה וַיִּקְבְּצוּ, אֶת-כָּל-אֶרֶץ מִצְרָיִם וְהָאֶרֶץ, וַיִּצְבְּרוּ-בָר תַּחַת יַד-פְּרָעֹה, אֶ כָּל בְּעָרִים--וַיִּשְׁמְרוּ. לֹ וַהֲנֵה הָאֶרֶץ לְפָקְדוֹן, לְאֶרֶץ, לְשִׁבְעַת שָׁנֵי הָרְעָב, אֲשֶׁר תִּהְיֶינָה בְּאֶרֶץ מִצְרָיִם; וְלֹ א-תִּפְקֹד הָאֶרֶץ, בְּרָעָב. לֹ וַיִּטֵּב הַדָּבָר, בְּעֵינֵי פְרָעֹה, וּבְעֵינֵי, כָּל-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? וגרמה לפרעה לשנות את סדרי הממלכה. נציין שלא מוזכר בסיפור המקראי מהי התופעה שגרמה לשובע ואח"כ לרעב, אבל מהסיפור עולה, שבזמן הרעב לא היה חריש וקציר במצרים (בראשית מד 1), וגם הסוף של הרעב בא לידי ביטוי ע"י זריעה (בראשית מז כג).

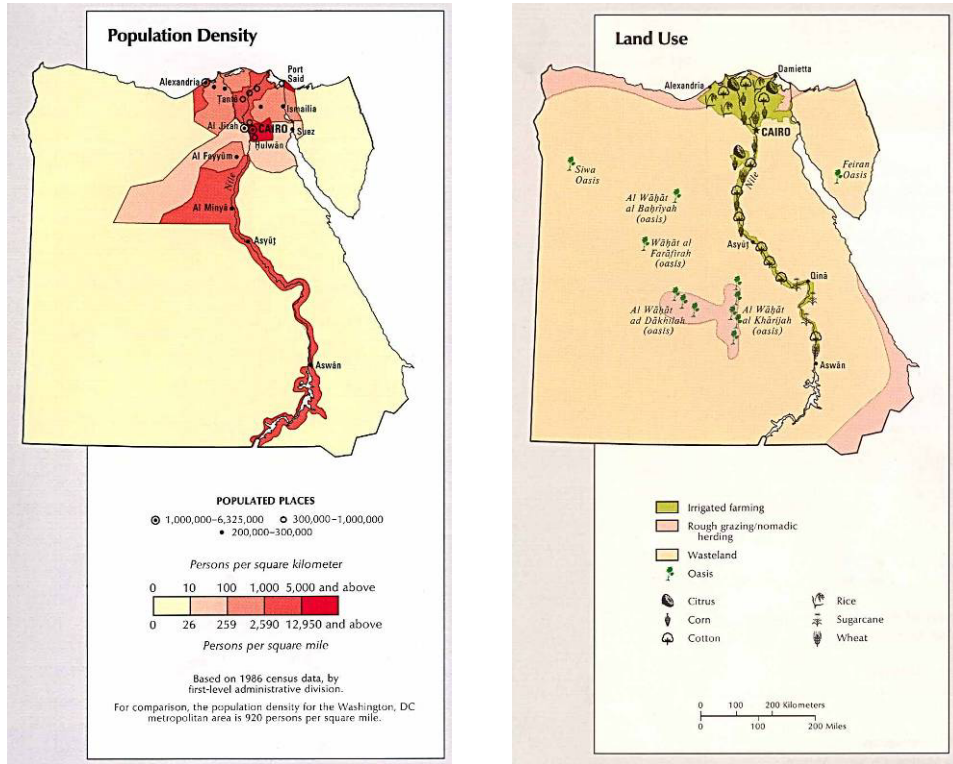
התשובה לשאלות אלו ולהבנת הסיפור תתבסס על הכרה מקרוב של החיים במצרים. בעבודה זו נתאר בקצרה את התלות המוחלטת של חקלאות מצרים בגאות הנילוס (פרק 2), וההשלכות המדיניות הנובעות מכך (פרק 3). נתאר מדידות של גאות הנילוס שהחלו לפני כ-5000 שנה (פרק 4). נבחן את הרקע הפיסיקלי והסטטיסטי של הגאות (פרק 5) והתלות שלה בתופעות אקלימיות בולטות שסקלת הזמן שלהן מספר שנים (פרק 6).

2. חשיבות הנילוס למצרים

מלכות מצרים העתיקה (Old Kingdom) החלה בשנת B.C 3100 עם האיחוד של מצרים העליונה והתחתונה תחת שלטון מרכזי אחד. מצרים העליונה הנה 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-200ק"מ ואורכה כ-400ק"מ, (Hassan, 2005) (ציור 1). 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 שנשתמרו עד היום במלוא פאר שרידיהם. מצרים תלויה למחייתה באופן מוחלט בנילוס מכיוון שזה מקור המים היחידי המשמעותי בכל המדבר אשר מכסה את צפון מזרח אפריקה. לכן התפתחותה הכלכלית, התרבותית, המדינית והדתית הייתה סביב הנילוס. החיים במצרים העילית מתרכזים ברצועה צרה שרוחבה ק"מ בודדים לאורך הקניון של הנילוס, ואלו במצרים התחתית מצפון לקהיר ועד לים האוכלוסייה מתפרסת על השטחים הנרחבים של הדלתה (ציור 1; ראה גם ציור 1 של (Hassan 2005)). הטיב לתאר תלות זו ההיסטוריון היווני הרודוטוס כשביקר במצרים באמרתו הידועה "מצרים היא מתנת הנילוס".

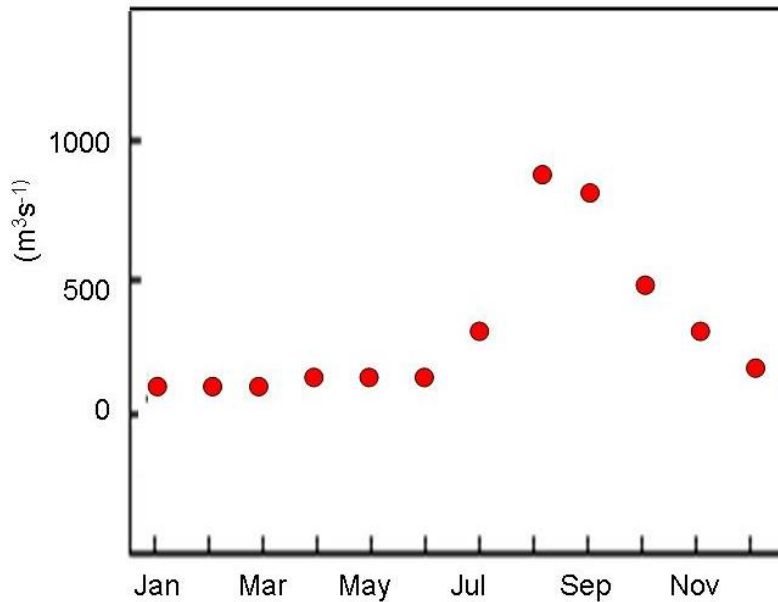
השנה במצרים מתחלקת לשלוש עונות בהתאמה עם המהלך השנתי של הגאות והשפל של הנילוס (ציור 2). בעונה הראשונה, אוגוסט-ספטמבר, בתקופה זו הנילוס גואה ומפלס המים עולה בכ-7מטר בקהיר, המים מציפים ומדשנים (ע"י הסחף המכיל מלחי דישון) שטחים נרחבים. ההצפה במצרים העילית הנה לאורך הקניון של הנילוס ברוחב של מספר ק"מ בודדים 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. בעונה השנייה, בחודשים נובמבר-דצמבר, חורשים וזורעים את השדות לאחר שפני המים ירדו. בעונה השלישית, בחודשים ינואר-מאי, מפלס המים קרוב למינימום ובחודשים מרץ-מאי קוצרים את התבואה לאחר הבשלתה (Baines, 2002).

ציור 1: גאוגרפיה כלכלית וחברתית של מצרים היום.



ציור 1ב: צפיפות אוכלוסין. בעבר האזור שבין אסוּט לקהיר היה מיושב רק לאורך הנילוס.
http://www.lib.utexas.edu/maps/atlas_middle_east.

ציור 1א: שימושי קרקע.
http://www.biologie.uni-hamburg.de/b-online/afrika/maps/egypt_land.htm



ציור 2: כמות המים הממוצעת הזורמת בנילוס בחרטום כפונקציה של חודשי השנה.

עד למאה ה-19 לא היו ידועים מקורות הנילוס והסיבה לגאות שלו. בגלל חשיבותו התרבותית והמעשית העסיק נושא זה גיאוגרפים ונוסעים רבים מאז ימי הביניים. המצרים הקדמונים תלו את הגאות ברצון האלים, וע"פ אמונתם הופעתו של האל האפי גרמה לגאות הנילוס, וכאשר אחר להופיע גם הגאות איחרה. היום, כתוצאה מהתגליות הגיאוגרפיות של המאה ה-19 מקורות הנילוס ידועים והם בעיקרם שניים (ציור 3): האחד הוא הנילוס הלבן שמקבל את מימיו מהאגמים ויקטוריה ואלברט שקרובים לקו המשווה. הגשמים באזורים הטרופיים הללו מרובים ודי מתמידים ולכן הזרימה בנילוס הלבן די אחידה במשך כל השנה.



ציור 3: אגן ההיקוות של הנילוס. הנילוס הלבן יוצא מאגם ויקטוריה בקו המשווה. הנילוס הכחול מקורו בגשמים ברמת אתיופיה בגובה 2200 מ'!
http://www.fas.usda.gov/pecad/highlights/2005/09/uganda_26sep2005/images/nile_basin.htm

המקור השני הוא הנילוס הכחול ונהר האטברה. מקורם ברמת אתיופיה והם ניזונים מגשמי המונסון שיוורדים 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 (ציור 2). מנימום 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.

3. הרעב במצרים

הסיפור בתורה על חלומות פרעה ופתרונו של יוסף על רעב ממושך מביא לפנינו את אחת הבעיות המרכזיות שהעסיקה את מלכי מצרים החל מהשושלת הראשונה ועד לבניית סכר אסואן הראשון ב-1922. הרעב במצרים הנו תוצאה ישירה של גאות נמוכה בנילוס; מפלס מים נמוך מדאי 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 ב-2185 B.C, או כיבוש מצרים ע"י הפטמידים ב-969 A.D. עדויות רבות לרעב כבד כתוצאה ממפלס נמוך של גאות הנילוס שהביא לתמורות חברתיות ומדיניות במצרים ניתן למצוא אצל Said (1993). תאור של רעב ממושך מצוי בכתובת של "אבן הרעב" (Famine Stele), ציור 4. אבן זו מצויה באי סהיל (Sehel Island) ומיוחסת למלך ד'וסר (Djoser), המלך השני בשושלת השלישית של הממלכה העתיקה. 2667-2686 B.C) אך כנראה נכתבה ע"י Ptolemy V Epiphanes (מלך במצרים בין השנים 181-205 B.C שניסה להזדמות למלך ד'וסר). בכתובת מסופר על רעב כבד ששרר במצרים במשך שבע שנים כתוצאה ממפלס נמוך של הנילוס כך שלא ניתן היה להשקות את השדות, רעב אשר הביא את מצב העם לידי ייאוש. למלך ד'וסר בחלומו נגלה 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 המיסים, וניהול חכם של משק המים.

גובה המיסים בכל שנה נקבע בהתאם ליבולים, כיוון שגובה היבול הנו תוצאה ישירה של גובה גאות הנילוס. ניהול משק המים במצרים היה אחד הסודות השמורים, ומטרתו הייתה להמעיט ככל האפשר את נזקי הבצורת כתוצאה ממפלס נמוך של הנילוס. הניהול היה נתון במצרים העתיקה בידי החרטומים, אח"כ בידי הקופטים. ורק 120 שנה לאחר הכבוש הערבי עבר הניהול מהקופטים למוסלמים לאחר שמדעניהם למדו את הנושא שבין היתר כלל סטטיסטיקות של מפלס הנילוס (Popper, 1951).

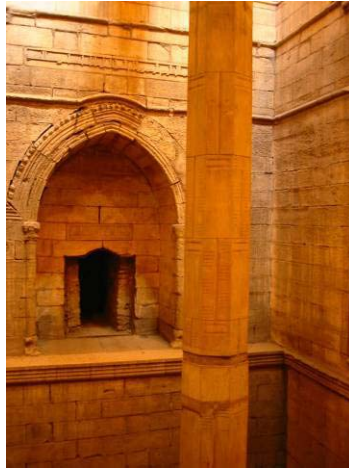


ציור 4: אבן הרעב, Famine Stela, באי סהיל באשד הראשון. <http://touregypt.net/Featurestories/picture04082005.htm> (צלם לא ידוע).

4. מדידות של גובה המים בנילוס

המצרים החלו במדידות של מפלס המים בנילוס כבר לפני כחמשת אלפים שנה. ב"אבן פלרמו" (the Palermo stone) מלפני כ-4500 שנה (המצויה כיום במוזיאון בפלרמו באיטליה) ועליה חרותה אינפורמציה רבה על מלכי מצרים, יש נתונים של גובה גאות הנילוס בתקופה שארכה כ-700 שנים (B.C 3100.- B.C 2400.). המד של גובה מפלס הנילוס נקרא בשמו היווני נילומטר (Nilometer). הנילומטרים פשוטים הראשונים היו למעשה סימון גובה מפלס המים המכסימלי על הסלעים שבגדות הנילוס. מד אחר היה מורכב מסדרת מדרגות ושנתות על גדת הנהר וגובה מפלס המים נקבע על פיהן. במקרה זה הסקלה הייתה קבועה אך שרירותית ולכן המדידה לא הייתה מדויקת. המד המדויק ביותר היה

באר שאליה הובלו מי הנילוס וגובה המפלס סומן על קירות הבאר או על עמוד שנבנה במרכז הבאר,
(Shahin, 1985), ראה ציור 5.



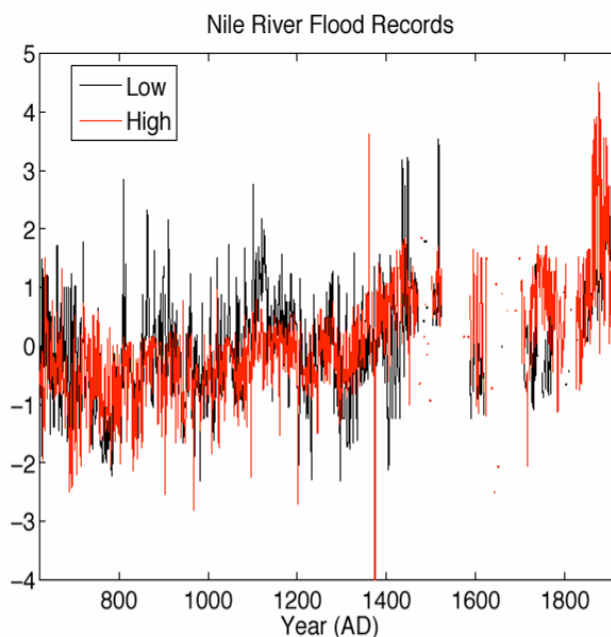
ציור 5: נילומטר משוכלל ומדויק בקהיר. צולם ע"י Mike Hughes
[/http://ecrc.geog.ucl.ac.uk/qarun](http://ecrc.geog.ucl.ac.uk/qarun) 2004

לאורך הנילוס מהאשד הראשון בדרום ועד לקהיר בצפון, מצויים נילומטרים רבים. בגלל חשיבותו שימש
הנילומטר מוטיב קישוטי במספר פסיפסים מסביב לים התיכון. דוגמא בולטת מופיעה בפסיפס "הג
הנילוס", בציור 6. בפסיפס מתואר אדם עומד על גבו של אדם אחר



ציור 6: פסיפס "חג הנילוס" מהמאה החמישית לספירה, מהעיר ציפורי שהייתה בירת הגליל בין המאה הראשונה לרביעית. צולם ע"י יגאל פליקס, 2005.

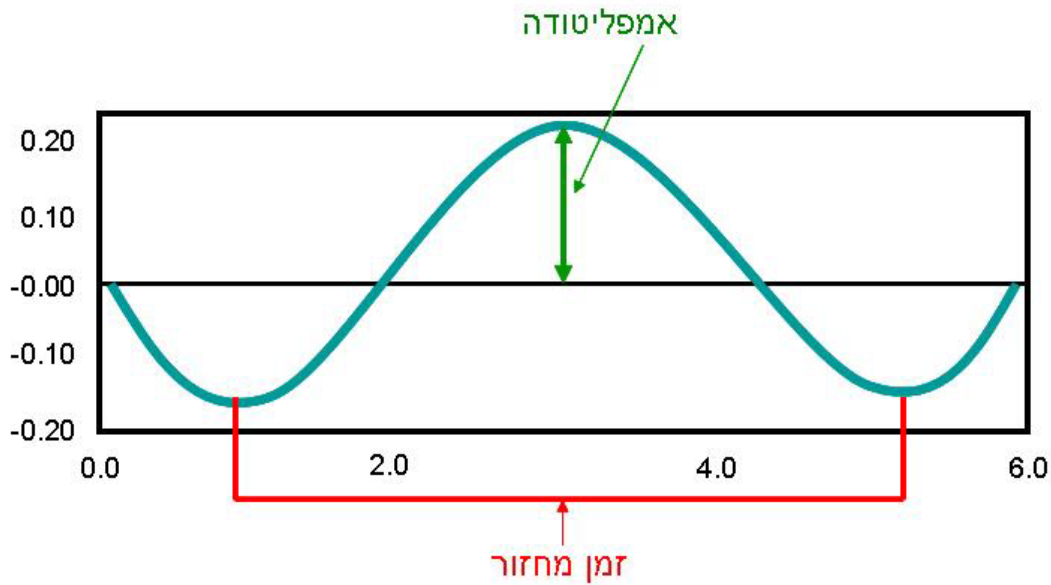
ומפסל את האותיות, IZ (=יז), שמציינות את גובה גאות הנילוס, דהיינו, 17 אמות. כאשר הנילוס הגיע לגובה זה היו פותחים את תעלות ההשקיה להצפת השדות וזה היה הסימן לתחילת "חג הנילוס" במצרים. כיום מצויה בידינו סדרת מדידות של המינימום והמכסימום השנתיים של גובה מי הנילוס בין השנים A.D 622-1922 (ציור 7). המדידות נאספו ממקורות שונים ע"י הנסיך המצרי Toussoun, (1925), ותוקנו ע"י Popper (1951). נתונים נוספים מופיעים גם בספרים של Ghaleb (1951) ושל Hurst (1952). התיקונים לסדרה כוללים את: השינויים באורך האמה (יחידת המדידה שהשתמשו למדידת מפלס הנילוס) במשך 1300 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 בשימוש מדעי בן ימינו. המדידות שבסדרה זו הנם מהנילומטר שבאי רודה ליד קהיר.



ציור 7: 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'. נלקח מ-KFG.

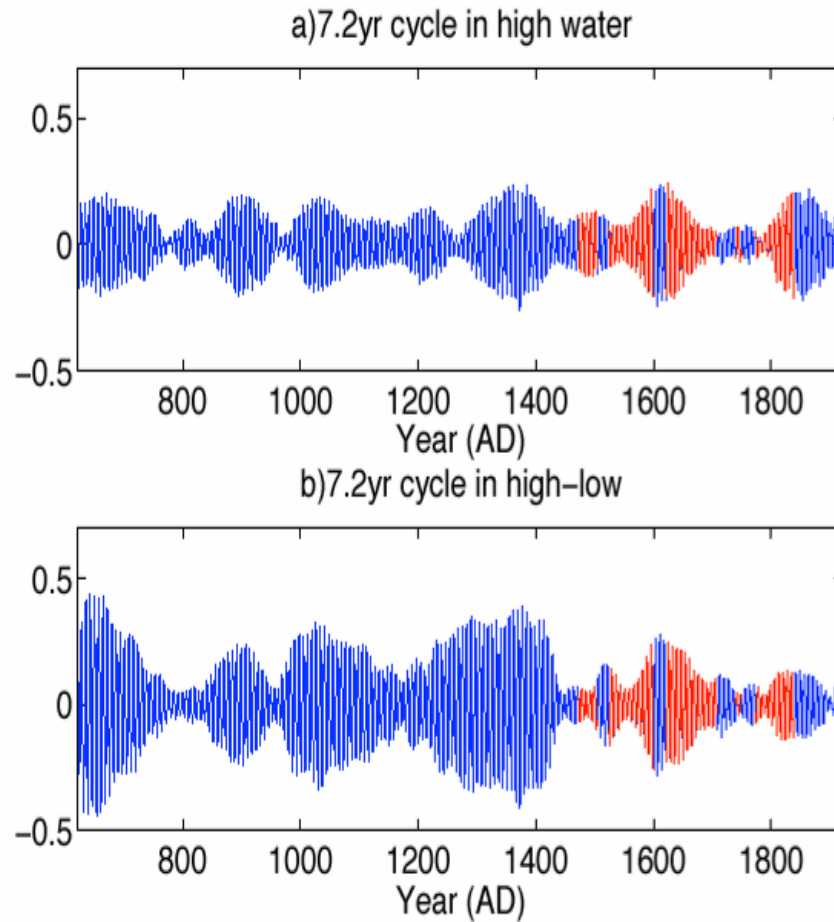
5. חקר האקלים לאור ניתוח מדידות הנילוס

חוקרים רבים נתחו את סדרת המדידות וחישבו את הספקטרום שלה; סיכום העבודות עד 1993 מצוי אצל Said (1993), ובין 1993-2005 אצל Kondrashov et al. (2005) (להלן KFG). רוב החוקרים התמקדו בניתוח הסדרה בין השנים A.D 622-1470 מכיוון שבתקופה זאת חסרות מעט מדידות. מאידך בין השנים A.D 1480-1922 חסרים נתונים רבים שלא אפשר לבצע אנליזה ספקטרלית בקטע זה של המדידות. KFG השתמשו בשיטה ספקטרלית מתקדמת (Ghil et al., 2002; Kondrashov and Ghil, 2006) להשלמת הקטעים החסרים בסדרות המינימום והמכסימום, וניתחו את הסדרות במשך כל 1300 השנים. הסדרות שהם ניתחו היו: סדרת המינימום, סדרת המכסימום וסדרת ההפרשים בין המינימום והמכסימום. סדרת ההפרשים מייצגת את התרומה של הנילוס הכחול לזרימה בקיץ. כל סדרת מדידות מן הטבע יש לה מרכיבים "חלקים" ומרכיבים "רועשים". הניתוח של (Hurst, 1952; Mandelbrot, 1982) מתרכז בחלק הרועש. KFG, כמו רבים לפנייהם (DePutter et al., 1998; Quinn, 1992) התרכזו במרכיבים החלקים, שיכולים להצביע על הגורמים הפיסיקליים. המרכיבים הללו כוללים בעיקר תנודות כמו זו שמתוארת בציור 8א. תנודת כזאת מאופיינת ע"י זמן המחזור, האמפליטודה והפאזה; הפאזה נותנת את העיתוי של נקודות הקיצון (מכסימום או מינימום).



ציור 8א: הקו הירוק הנו תנודה. זמן המחזור של התנודה מצוין בקו האדום ומודד את הזמן בין שתי נקודות מינימום או מקסימום סמוכות.

בניתוח של KFG התקבלו מספר תנודות שזמן המחזור שלהן הוא: 2.2, 4.2, 12, 19, 64 ו-256 שנים. התנודות הקצרות, 2.2 ו-4.2 שנים, מקורן ב-El-Nino/Southern Oscillation (ENSO) (Quinn, 1992), התנודות הארוכות 64 ו-256 שנים, מקורן כנראה בתופעות שמימיות (De Putter et al., 1998). בנוסף לתנודות ידועות אלה, קבלו KFG בסדרת המכסימום ובסדרת ההפרשים תנודה חדשה, שזמן המחזור שלה הוא 7 שנים; שחזור של תנודה זו נתון בציור 8ב. האמפליטודה של התנודה משתנה באופן משמעותי במשך פרק הזמן הנדון והם מציינים שינויים אקלימיים מרחיקי לכת. בולט במיוחד הגידול באמפליטודה בסביבות A.D 950 וההקטנה שלה ב-A.D 1450, המציינים שינויים אקלימיים מהירים בהתחלה ובסוף התקופה החמה של ימי הביניים באירופה; תקופה חמה זו צוינה, למשל, ע"י התישבות הויקינגים בגרילנד. KFG שערך שתנודה זאת, בת שבע השנים, נגרמת ע"י 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 ספקטראליים של 7 שנים.



ציור 8ב: שחזור התנודה ה-7 שנתית; ציור עליון סדרת המכסימום, ציור תחתון בסדרת ההפרשים, מכסימום-מינימום, המייצגת את הזרימה של הנילוס הכחול. נלקח מ-KFG.

6. מקור התנודה ה-7 שנתית

התנודה ה-7 שנתית בולטת בסדרת המכסימום ובסדרת ההפרשים ולכן אנו מסיקים שהנילוס הכחול ונהר האטברה הם המקור לתנודה זאת שכן בקיץ כ-90% מהמים בנילוס מקורם בנהרות אלו (ראה פרק 2). המקור למי הנילוס הכחול ונהר האטברה הנו בגשמי המונסון ברמת אתיופיה בחודשים יוני-ספטמבר. הגשמים ברמת אתיופיה הם תוצאה של הלחות המוסעת אל הרמה משלושה מקורות שניתן לעמוד עליהם ע"פ מסלולי ההסעה של הלחות, והם נתונים בציור 9. המסלול הקצר ביותר תחילתו באוקיינוס ההודי (מס' 1 בציור 9): כאשר האוויר הלח המוסע ע"י זרם סומלי פוגש את רכס הרי אתיופיה הוא עולה, מתקרר, מתעבה ויורד כגשם. 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 ע"י המונסון ההודי, שמושפע רבות ע"י ENSO, וזהו המקור של התנודות הקצרות בסדרות שלנו (Quinn, 1992),

שכן מחזוריים של 2.2 ושל 4-5 שנים ידועים ביותר בתופעות הקשורות ל-ENSO (Ghil et al., 2002).

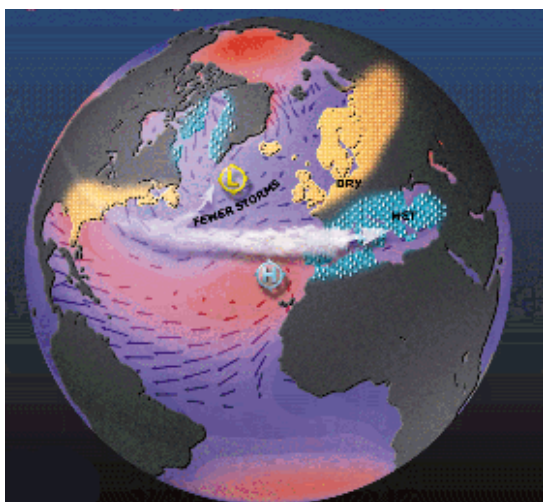


צור 9: מסלולי הסעת הלחות לרמת אתיופיה.

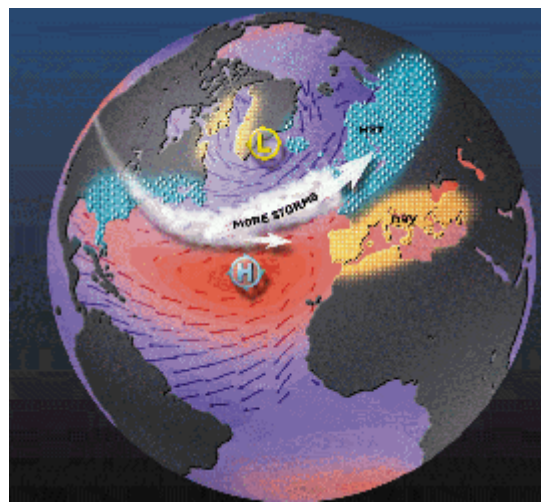
המסלול השני תחילתו באזורים הטרופיים של האוקיינוס האטלנטי, קרוב לקו המשווה (מס' 2 בצור 9). הלחות מוסעת בשכבות הנמוכות של האטמוספירה (מתחת ל-3 ק"מ) ע"י הזרימה המערבית צפון מערבית של רוחות הסחר (trade winds) לאזור המפגש עם הזרימה הצפון מזרחית. אזור המפגש נקרא Inter Tropical Convergence Zone, (ITCZ). באזור המפגש האוויר הלח עולה לשכבות הגבוהות, מתקרר, מתעבה ומוריד גשם. בקיץ ה-ITCZ נע צפונה עד לקו רוחב $20^{\circ}N$ - $15^{\circ}N$, דהיינו, עד לרמת אתיופיה.

המסלול השלישי תחילתו בצפון האוקיינוס האטלנטי ובים התיכון (מס' 3 בצור 9), משם האוויר הלח מוסע ע"י הרוחות בשכבות הנמוכות של האטמוספירה לדרום מזרח דרך הים האדום לרמת אתיופיה. כשהאוויר הלח פוגש בהרי אתיופיה הוא מתרומם לגבהים שמעל 3000 מ' ומוסע לצפון מערב ע"י הזרם הטרופי המזרחי אל מעל לרמת אתיופיה. האוויר בעלייתו מעל לרמה מתקרר, מתעבה ומוריד גשמים באגן ההיקוות של הנילוס הכחול והאטברה. מסלול זה בולט במפות של שטף הלחות והוא קיים רק בתקופת הקיץ ראה (James (1995, p.250), Mariotti and \struglia (2002), Mohamed et al. (2005).

אנו משערים שהתנודה ה-7 שנתית של הנילוס הנה תוצאה של הסעת הלחות במסלול זה, שכן ל-NAO השפעה משמעותית על האקלים בצפון האוקיינוס האטלנטי ובים התיכון. כדי לעמוד על הקשר בין התנודה ה-7 שנתית של צפון האוקיינוס האטלנטי וזו של הנילוס תחילה נתאר את ה-NAO. ל-NAO יש השפעה משמעותית על האקלים באירופה, צפון מזרח אמריקה ובמדינות הים התיכון (Hurrell, 1995, 1996). לתנודה שתי פאזות בולטות: בפאזה הראשונה (ציור 10א), הלחץ באיים האזוריים (מסומן ב-H בציור) גבוה מהממוצע ובאיסלנד (מסומן ב-L בציור) הלחץ נמוך מהממוצע. הפרש הלחצים בגובה פני הים בין האיים האזוריים לאיסלנד נקרא האינדקס של ה-NAO, (NAOI); מקובל להחסיר ממנו 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 מהממוצע בחורף. מדינות דרום אירופה והים התיכון בשנים אלו סובלות ממעוט גשמים ובצורות. בפאזה השניה (ציור 10ב), הלחץ באיים האזוריים נמוך מהממוצע



ציור 10ב: הפאזה השניה, האינדקס שלילי.
<http://www.ideo.columbia.edu/NAO>

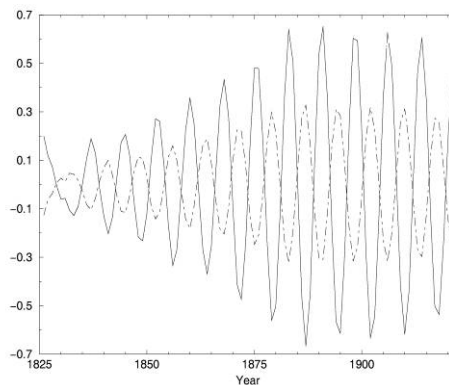


ציור 10א: הפאזה הראשונה בתנודה של צפון האוקיינוס האטלנטי, NAO, האינדקס חיובי.

ובאיסלנד גבוה מהממוצע, כך שהאינדקס שלילי ומצב זה גורם לזרימת אוויר מהאוקיינוס האטלנטי לדרום אירופה ולים התיכון. הסעת האוויר הימי החם והלח מהאוקיינוס האטלנטי לדרום אירופה ולים התיכון גורם להגברת הגשמים ולטמפרטורות גבוהות מהממוצע בחורף. בצפון אירופה הגשמים מועטים

והטמפרטורות נמוכות מהמוצע. קיימות מדידות של הממוצע החודשי של ה-NAOI החל משנת 1825 (ftp://ftp.ncdc.noaa.gov/pub/data/paleo/contributions_by_author/jones2001).

בחינת הקשר בין ה-NAO והנילוס מתבצעת ע"י בחינת הקשר בין סדרת הזמן של ה-NAOI וסדרת הזמן של גובה המכסימום של הנילוס בין השנים 1825-1922; זהו פרק הזמן שבו שתי הסדרות חופפות. כדי למצא את המחזורים המשותפים לשתי הסדרות השתמשנו באנליזה ספקטרלית רבת משתנים, Multi channel Singular Spectrum Analysis (MSSA), לפי Ghil et al., (2002). (רוחב חלון הזמן שנלקח לאנליזה זו היה 40 שנה. שני המרכיבים העצמיים הראשונים נותנים את המגמה (trend); סקלת הזמן של השינויים במרכיבים אלו גדולה מ-40 שנה. זוג ההמרכיבים הבאים נותנים את התנודה ה-7 שנתית רמת הוודאות הסטטיסטית של תוצאות אלו היא 95%. שחזור התנודה בכל אחת מהסדרות נתון בציור 11.



ציור 11: שחזור של התנודה ה-7 שנתית. קו רציף האינדקס של ה-NAO, קו מקוקו גובה גאות הנילוס.

מהציור עולה שקיים הפרש פאזה של חצי מחזור (3.5 שנים) בין שתי הסדרות, דהיינו, כאשר ה-NAOI שלילי אזי הגאות בנילוס גבוהה וכאשר האינדקס חיובי הגאות בנילוס נמוכה. תוצאה זו מתאימה לשתי הפאזות של התנודה של ה-NAO שתוארה לעיל. כאשר האינדקס שלילי אזי יותר לחות מוסעת מהאוקיינוס האטלנטי לים התיכון (ציור 10ב) ומשם מעל צפון מזרח אפריקה לרמת אתיופיה (מסלול 3 בציור 9). כתוצאה מכך כמות הגשמים והזרימה בנילוס הכחול גדלה והגאות בנילוס גבוהה. בשנים בהן ה-NAOI חיובי פחות לחות מוסעת מהאוקיינוס האטלנטי לים התיכון (ציור 10א), ומשם לצפון מזרח

אפריקה ולרמת אתיופיה. כתוצאה מכך כמות הגשמים והזרימה בנילוס הכחול קטנה והגאות בנילוס נמוכה.

מניתוח זה ניתן להסיק של-NAO יש השפעה על הגשמים ברמת אתיופיה ולכן תחזית ארוכת טווח של כמות המים הצפויה בנילוס צריכה להביא בחשבון השפעה זו.

7. סיכום

הסיפור בספר בראשית של חלומות פרעה והפתרון של יוסף הנו דוגמה בולטת לתחזית ארוכת טווח שממנה נגזר תכנון ובצוע 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 ארכיאולוגיים ועדויות הסטוריות אשר לפיהן הרעב העסיק את הממלכה המצרית למעלה מ-5000 שנה. הרעב היה תוצאה ישירה של גאות נמוכה של הנילוס וכתוצאה מכך לא ניתן להשקות חלק ניכר מהשדות והיבולים קטנים. בשנים בהן הגאות הייתה נמוכה במיוחד שרר רעב כבד במצרים הממלכה המצרית נחלשה ולא פעם התחלף השלטון במצרים כתוצאה מרעב ממושך כזה. לפכך מדידות של גובה גאות הנילוס ע"י נילומטר החלו לפני למעלה מ-5000 שנה ומטרתן הייתה לקבוע את גובה המסים ותכנון נכון של משק המים.

ניתוח של המדידות מראה שקיימות תנודות של שנים ועשרות שנים בגובה גאות הנילוס כאשר אחת התנודות הבולטות הנה בת מחזור של 7 שנים. כתוצאה מתנודות אלו אנו עדים לגאות גבוהה שנמשכת מספר שנים ולאחריה גאות נמוכה שנמשכת מספר שנים. יוסף ופרעה כנראה הכירו תופעה זאת שכן עמדו לפנייהם מדידות שהחלו להחלו למעלה מאלף שנה לפני זמנם. יש להניח שטובי המלומדים של התקופה (כנראה החרטומים) הקדישו זמן רב לניתוח המדידות עקב התלות המוחלטת של מצרים בגאות הנילוס. אמנם לא עמדו לרשותם להפרדה בין המרכיבים החלקיים של סדרות המדידות שעומדים כיום לרשותנו. יש לשער שבתקופתם היה ההפרש בין שתי הפאזות הקיצוניות של ה-NAO היה חזק במיוחד ושהתנודה בת שבע השנים הייתה בולטת במיוחד. לכן קיבל פרעה את תחזיתו של יוסף. התוכנית הכלכלית, המדינית והחברתית ארוכת הטווח שהציע יוסף אפשרה למצרים להתקיים גם בתקופות רעב ממושכות. כדי שניתן יהיה לתת תחזית ארוכת טווח של השינויים בכמות המים הזורמת בנילוס עלינו 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 ה-7 שנתית בגאות הנילוס. ההשפעה של ה-NAO על הגשמים ברמת אתיופיה הנה כתוצאה מהסעת אוויר ימי לח מצפון האוקיינוס האטלנטי ומהים התיכון דרך הים האדום אל רמת אתיופיה. הפאזה ההפוכה בין התנודה ה-7 שנתית של האוקיינוס האטלנטי ובין התנודה ה-7 שנתית של גאות הנילוס מוסברת ע"י שתי הפאות 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 ולהפך כאשר האינדקס חיובי.

מעבודתנו עולה שתחזית ארוכת טווח של הזרימה בנילוס וההשלכות הנגזרות ממנה לגבי ניצול המים ע"י המדינות באפריקה הקשורות עם הנילוס ומקורותיו, צריכה להעזר גם בנתונים הקיימים על התנודה של צפון האוקיינוס האטלנטי.

דברי תודה: לאורנה פליקס על עזרתה ועצותיה הטובות. נתונים דיגיטליים של הנילוס התקבלו מ-

Don Percival ומ-Thierry de Putter

רשימת ספרות

- Baines, J., 2002: BBC- History- The Story of the Nile
http://www.bbc.co.uk/history/ancient/egyptians/nile_01.shtml
- De Putter, T., M. F. Loutre, and G. Wansard, 1988: Decadal periodicities of Nile River historical discharge (A.D. 622-1470) and climatic implications, *Geophys. Res. Lett.*, 25, 3193-3196.
- Ghaleb, K. O., 1951: Le Mikyas ou Nilometer de lile de Rodah, *Mem. Inst. Egypte*, 54, 182pp.
- Ghil, M., et al., 2002: Advanced spectral methods for climatic time series, *Rev. Geophys.*, 40(1), 1003, doi:10.1029/2000RG000092.
- Hassan, F. A., 2005: A river runs through Egypt: Nile floods and civilization. *Geotimes Magazine*, April 2005.
- Hurrell, J. W., 1995: Decadal trends in the North Atlantic Oscillation: Regional temperatures and precipitation. *Science*, 269, 676-679.
- Hurrell, J. W., 1996: Influence of variations in extratropical wintertime teleconnections on Northern Hemisphere temperature. *Geophys. Res. Lett.*, 23, 665-668.

Hurst, H. E., 1952: *The Nile*, 326pp., Constable, London.

James, I. N., 1995: *Introduction to Circulating Atmospheres*. Cambridge University press. 422p.

Kondrashov, D., Y. Feliks and M. Ghil, 2005: Oscillatory modes of extended Nile River records (A. D. 622-1922). *Geophys. Res. Lett.*,32, L1072, doi:10.1029/2004GL022156.

D. Kondrashov and M. Ghil, 2006: "Spatio-temporal filling of missing points in geophysical data sets," *Nonl. Proc. Geophys.*, 13, 151-159.

Mariotti, A. and M. V. Struglia, 2002: The hydrological cycle in the Mediterranean region and implications for the water budget of the Mediterranean Sea. *J. Climate*, 15, 1674-1690.

Mandelbrot, B., 1982: *The Fractal Geometry of Nature*, 680 pp., W. H. Freeman, San Francisco.

Mohamed, Y. A., B. J. J. van den Hurk, H. H. G. Savenije and W. G. M. Bastiaanssen, 2005: Hydroclimatology of the Nile: results from a regional climate model. *Hydrology and Earth System Sci.*,9, 263-278.

Popper, W., 1951: *The Cairo Nilometer*, 269pp., 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 *El Nino: Historical and Paleoclimatic Aspects of the Southern Oscillation'* edit by H. F. Diaz and V. Markgraf (eds.), pp. 119-149, Cambridge Univ. Press, New York.

Said, R., 1993: *The River Nile: Geology Hydrology and Utilization*, 320pp., Elsevier, New York.

Shaw, I., 2000: *The Oxford History of Ancient Egypt*. Oxford University Press.

Shahin, M., 1985: *Hydrology of the Nile Basin*. Elsevier, 575pp.

Toussoun, O., 1925: *Memoire sur l'histoire du Nil*, *Mem. Inst. Egypte*, 18, 366-404.

רשימת הציורים:

- ציור 1: גאוגרפיה כלכלית וחברתית של מצרים היום.
 ציור 1א: שימושי קרקע. http://www.biologie.uni-hamburg.de/b-online/afrika/maps/egypt_land.htm
 ציור 1ב: צפיפות אוכלוסין. בעבר האזור שבין אסיוט לקהיר היה מיושב רק לאורך הנילוס. http://www.lib.utexas.edu/maps/atlas_middle_east.
- ציור 2: כמות המים הממוצעת הזורמת בנילוס בחרטום כפונקציה של חודשי השנה.
- ציור 3: אגן ההיקוות של הנילוס. הנילוס הלבן יוצא מאגם ויקטוריה בקו המשווה. הנילוס הכחול מקורו בגשמים ברמת אתיופיה בגובה 2200 מ'.
http://www.fas.usda.gov/pecad/highlights/2005/09/uganda_26sep2005/images/nile_basin.htm
- ציור 4: אבן הרעב, Famine Stela, באי סהיל באשד הראשון. <http://touregypt.net/Featurestories/picture04082005.htm> (צלם לא ידוע).
- ציור 5: נילומטר משוכלל ומדויק בקהיר. צולם ע"י Mike Hughes 2004 <http://ecrc.geog.ucl.ac.uk/qarun>
- ציור 6: פסיפס "חג הנילוס" מהמאה החמישית לספירה, מהעיר ציפורי שהייתה בירת הגליל בין המאה הראשונה לרביעית. צולם ע"י יגאל פליקס, 2005.
- ציור 7: 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'. נלקח מ-KFG.
- ציור 8א: הקו הירוק (רציף) הנו תנודה. זמן המחזור של התנודה מצוין בקו האדום ומודד את הזמן בין שתי נקודות מינימום או מכסימום סמוכות.
- ציור 8ב: שחזור התנודה ה-7 שנתית; ציור עליון סדרת המכסימום, ציור תחתון בסדרת ההפרשים, מכסימום-מינימום, המייצגת את הזרימה של הנילוס הכחול. נלקח מ-KFG.
- ציור 9: מסלולי הסעת הלחות לרמת אתיופיה.
- ציור 10א: הפאזה הראשונה בתנודה של צפון האוקיינוס האטלנטי, NAO, האינדקס חיובי.
 ציור 10ב: הפאזה השנייה, האינדקס שלילי. <http://www.ideo.columbia.edu/NAO>
- ציור 11: שחזור של התנודה ה-7 שנתית. קו רציף האינדקס של ה-NAO, קו מקוקו גובה גאות הנילוס.