

הגורמים לשטפונות באגן הניקוז של ים המלח והשלכותיהם על הבנת האקלים בעבר

משה (קוקו) ארמון *

הקדמה

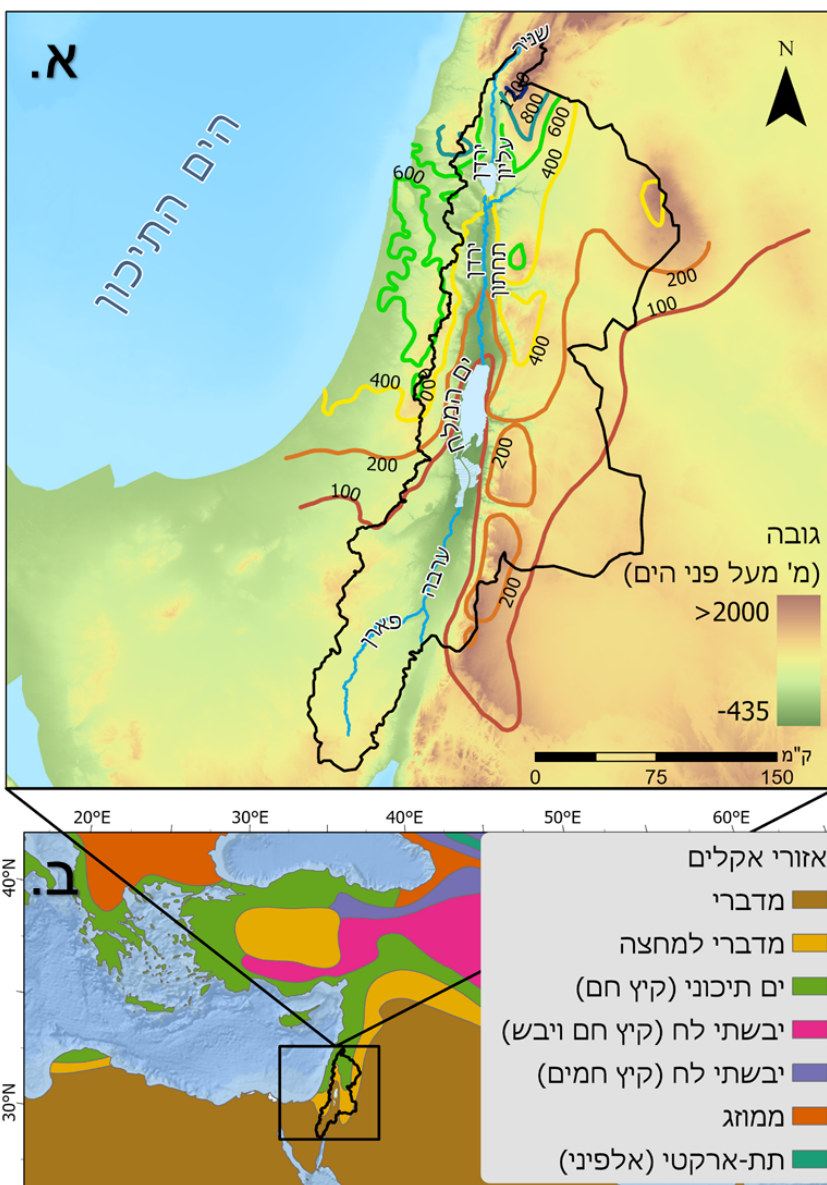
התנאים האקלימיים וההידרולוגיים ששררו באגן הניקוז של ים המלח ובסביבתו במאות אלפי השנים האחרונות השפיעו (ועודם משפיעים) על זרימת נחלים ומי תהום אל האגם, על קצב האידוי ממנו ועל אספקה של חומר גרגרי ומומס אליו. כיוון שים המלח הוא אגם טרמינלי, שינויים במפלסו מעידים על שינויים בתנאים הסביבתיים באגן הניקוז שלו והופכים את ים המלח למעין מד גשם ענקי. בדומה לכך, תוצרי התנאים הסביבתיים מגיעים לאגן, שוקעים ונאצרים ברקורד הסדימנטרי. לכן, הרקורד הסדימנטרי משמש מקור מידע עיקרי להבנת שינויים בתנאים הסביבתיים בעבר. עם זאת, התגובה של הרקורד ושל מפלסי האגם לשינויים בתנאים הסביבתיים אינה ישירה והיא כורכת בתוכה תהליכים רבים ומורכבים. לדוגמה, שינוי במשטר הגשם בעקבות שינוי בתדירות הסופות ובאופיו, ישפיע על זרימת המים בנחלים (נגר עילי) ועל שפיעת המעינות, אך הקשר הזה הוא קשר מורכב ולא ישיר; בנוסף, שינוי בנגר יכול להתבטא בשינוי ניכר במאזן המים של האגם, אך לאו דווקא בתוספת/הפחתה משמעותית של כמות החומר הגרגרי המגיע אליו. לכן, בבואנו לפרש את שינויי מפלס האגם בעבר, ואת השינויים בדפוסי השקעת סדימנטים כימיים וגרגריים בו נִדְרָשׁ להבין מהם התנאים הגורמים לשינויים בכניסת המים והסדימנט לאגם בהווה וכך אולי נוכל להקיש מהם על התנאים הסביבתיים בעבר. מטרתו של מאמר זה היא לדון בתנאים האטמוספריים וההידרולוגיים (הידרוטאורולוגיים) המכתיבים את אופי השטפונות באגן ים המלח בהווה: החל בתנאים הסינופטיים שמביאים ליצירת גשם באזור, דרך דפוסי הגשם השונים שתלויים באופי מערכות מזג האוויר, וכלה בסוג השטפונות התלוי במאפייני הגשם.

רקע גיאוגרפי

אגן הניקוז של ים המלח (איור 1), ששטחו כ-43,000 קמ"ר, הוא אגן הניקוז הגדול ביותר בדרום-מזרח הים התיכון. האגן משתרע על פני אזורים גאוגרפיים ואקלימיים שונים: מהחרמון בצפון-מזרח האגן (בגובה של כ-2,800 מ') עם ממוצע משקעים שנתי של יותר מ-1100 מ"מ שחלק ניכר מהם יורד כשלג

* המאמר הוא פרק מעבודת הדוקטור של משה ארמון באוניברסיטה העברית בירושלים בהדרכתם של יהודה אנזל ואפרת מורין.

ואקלים ים-תיכוני, דרך ים המלח (בגובה של כ-435 מ' מתחת לפני הים בשנת 2021) עם ממוצע משקעים של כ-70 מ"מ לשנה ומטה ואקלים מדברי, ועד דרום-מערבה לאילת, בחלקו העליון של נחל פארן (ג'יראפי) שם ממוצע המשקעים נמוך מ-30 מ"מ לשנה. בין האזור המדברי לים תיכוני משתרעת רצועה צרה שמאופיינת באקלים מדברי למחצה – מדרום לכנרת, דרומה עד הר הנגב והרי מואב (איור 1א). המשקעים באגן יורדים במהלך החורף ועונות המעבר (אוקטובר-מאי), והקיץ יבש כמעט לחלוטין. בהכללה, כמות המשקעים השנתית בכל אזור באגן תלויה במרחק מהים התיכון, מקור הלחות העיקרי ליצירת גשם – אזורים מערביים יותר הם גם גשומים יותר; בקו הרוחב – כמות הגשם עולה כלפי צפון בגלל הקרבה למסלולי השקעים האטמוספריים והמסלול הימי שעובר האוויר בדרכו לאזורים הצפוניים יותר; בגובה הטופוגרפי ובמפנה – אזורים גבוהים יותר הפונים מערבה "סוחטים" את הגשם מהאוויר כך שכשהוא מגיע לאזורים הנמוכים יותר והפונים מזרחה הוא מתייבש והגשם פוחת.



איור 1:

א. כמות גשם ממוצעת (קווים צבעוניים) באגן ים המלח (מסומן בשחור) והאזור **ב.** אזורי האקלים במזרח הים התיכון.

מאזן המים של ים המלח

מקורות המים הטבעיים של ים המלח מושפעים מההבדלים בתפרושת המשקעים, כך שהאזורים הצפוניים של האגן תורמים הרבה יותר למאזן המים של האגם ביחס לדרומיים. במאמר זה נתרכז במקורות הטבעיים של האגם, אך נזכיר שמאזן המים הטבעי הופר בצורה ניכרת כבר בשנות ה-60 של המאה ה-20, עם הקמת מוביל המים הארצי, שאיבת המים מהכנרת והטיות הזרימה מנהר הירמוך. זרימת הירדן הדרומי, מקור המים העיקרי של ים המלח, סיפקה במצב טבעי כ-1100-1400 מלמ"ש (מיליון מטר מעוקב לשנה) לים המלח. עיקר הזרימה הגיעה מהכנרת (כ-35-45% מהזרימה) והירמוך (30-40%). שאר המים הגיעו מנחלים המתנקזים לירדן הדרומי מהרי יהודה ומהרי הגלעד. מים מגיעים לים המלח גם ישירות מנחלים המתנקזים אליו ממזרח, ממערב ומדרום (לפי סדר החשיבות; כ-100 מלמ"ש סה"כ), ממי תהום הנובעים ישירות אל האגם (כ-100 מלמ"ש) ומגשם ישיר על האגם (כ-45 מלמ"ש).

כלומר, מאזן המים של ים המלח נשלט בעיקר ע"י גשמים בחלקו הצפוני של אגן הניקוז. גשמים אלו מכתיבים את שפיעת המעיינות המזינים את הירדן העליון, מצפון לכנרת, ובכך משפיעים על הירדן התחתון. השינויים התוך-עונתיים של שפיעת המעיינות קטנים בהרבה מהשונויות העיתיות של הגשם, מכיוון שהמים אליהם זורמים באיטיות כמי תהום. לכן, ברמה השנתית קיים מתאם גבוה מאוד בין כמות הגשם במעלה האגן לבין נפח המים הזורם בירדן העליון והנפח שמגיע בסופו של דבר לים המלח ($r=0.91$ - $r=0.82$ בין כמות הגשם בכפר גלעדי לבין נפח הזרימה בגשר הפקק ושינויי המפלס השנתיים של ים המלח, בהתאמה). חשוב לזכור את התפקיד המשמעותי של סופות גשם בדידות במאזן הגשם והנגר השנתי וכן בהולכת סדימנטים נחליים לאגם. בנחלים המדבריים אין כמעט זרימת בסיס, כך שכל הנגר השנתי מקורו בסופות בדידות. בנוסף, חלק ניכר מהגשם השנתי מגיע במהלך סופות גדולות, כך שלסופות אלו יש חשיבות מיוחדת.

רקע (פליאו)אקלימי

על פי מגוון עדויות גיאולוגיות, התנאים ההידרולוגיים והאקלימיים באגן ים המלח השתנו בצורה ניכרת לאורך מאות אלפי השנים האחרונות. תיארוך קווי חוף עתיקים מעיד על גובה מפלס האגם בעבר ובונה את עקומת מפלס האגם לאורך הזמן. גם עדויות נוספות עוזרות לפענח את היסטורית האגם. לדוגמא, הרכב התמלחת באגם שנגזר ממאזן המים והמלחים המגיעים אל האגם משפיע על ההרכב המינרלוגי של משקעי האגם ונאצר במי חללים (במאמרו של אילן לוי, בחוברת זאת). ההבדלים המינרלוגיים יוצרים

מאספי משקעים המעידים על תקופות רטובות/יבשות יותר, ומחשופי סלע וקידוחים מאפשרים לזהות את ההשתנות שלהם במרחב ובזמן (במאמרים של נורית ובר ועידו סירוטה בחוברת זאת). בעשרות השנים האחרונות נצבר ידע רב על ההיסטוריה האקלימית וההידרולוגית של אזור ים המלח – חילופים בין תקופות יבשות ורטובות יותר מופיעים כתנודות עם כמה אורכי גל. התנודה עם הגל הארוך ביותר, עשרות אלפי שנים, מתרחשת במקביל לשינויים בין תקופות קרח לתקופות בין-קרחוניות: תקופות בין-קרחוניות מאופיינות במפלסי אגם נמוכים, סביב גובה 400- מ' מגובה פני הים, בעוד שתקופות קרחוניות (לפחות האחרונה שבהן) מאופיינות במפלסים גבוהים עם משרעת שינויים גדולה יותר, כאשר רוב הזמן האגם היה בגובה כ-200- עד 300- מ'. באופן אינטואיטיבי אפשר לחשוב על התקופות החמות כעל "קייציות" יותר – ולכן פחות גשם, בעוד שהתקופות הקרות "חורפיות" וגשומות יותר. אך ישנם גם שינויים קצרי טווח – למשל, לאורך תקופת הקרח האחרונה זוהו לפחות 5 תקופות בנות כאלף עד כמה אלפי שנים שבהן המפלס היה נמוך באופן יחסי לתקופה. תקופות אלה מקושרות ל"אירועי היינריך" שבהם הטמפרטורה העולמית הייתה נמוכה במיוחד וכך גם מי הים התיכון – דבר שהביא להפחתה של הלחות ושל כמויות המשקעים בתקופות אלה. לאורך אלפי השנים האחרונות ועד לתחילת המאה ה-20 מפלס האגם התנווד סביב גובה של כ- 400 ± 10 מ' בתנודות במשך של עשרות עד מאות שנים. על פי מחקרים עכשוויים, תנודות אלה התרחשו כתוצאה ממגמות שינוי במשקעים של כ-40% ועד +20% ביחס להיום. כלומר, התקופה הנוכחית היא תקופה רטובה ביחס לממוצע באלפי השנים האחרונות.

מטרות המאמר

שינוי בתדירות של מערכות מזג אוויר חורפיות בעשרות אלפי השנים האחרונות (סוף תקופת הפלייסטוקן ולאורך ההולוקן) מסביר חלק מהעדויות הגיאולוגיות לשינויים במשטר ההידרולוגי, אך גם שינויים אחרים יכולים להשפיע על המשטר ההידרולוגי. כיצד עלינו לפרש תקופות בעבר שבהן זהו יותר שטפונות ומה ההבדל בין לבין תקופות עם תדירות שטפונות פחותה? מהן המערכות הסינופטיות שגורמות לכניסה מוגברת של מים לאגם? האם אלה אותן מערכות שגורמות לשטפונות? אילו מערכות מביאות סחף (סדימנט) לאגם? כדי לענות על שאלות אלה אנו נדרשים להבין טוב יותר את מערכות מזג האוויר העיקריות הפועלות כיום ואת השפעתן על המאזן ההידרולוגי והסדימנטולוגי בים המלח. מאמר זה מסביר את ההשפעה האפשרית של מערכות מזג האוויר השוררות כיום ודן, באמצעות דוגמאות ממחקרים מהשנים האחרונות, בהשלכות של שינויים אפשריים בתדירות ובעוצמה שלהן בעבר הגיאולוגי הקרוב וגם בעתיד הקרוב מאוד.

תנאים מטאורולוגיים שגורמים לגשם במזרח הים התיכון

התנאים האטמוספריים הדרושים ליצירת גשם

התנאים הבסיסיים הדרושים ליצירת גשם הם לחות מספקת ועליית אוויר. גשם נוצר כאשר ענן מתפתח במשך זמן ועומק מספיקים. בעננים כאלה טיפות המים בענן (טיפונות) מתנגשות, מתלכדות וגדלות. תהליכים אלה מואצים כאשר גבישי קרח מופיעים בענן ולכן גשם באזורנו נוצר כמעט רק כשהעננים נעשים מפותחים (עמוקים) ופסגותיהם קופאות. לכן, מרבית ענני הגשם בארץ הם עננים ערמתיים (קומולוסים) בעלי עומק טיפוסי של לפחות 1.5 ק"מ. מכיוון שהיבשה סביב מזרח הים התיכון צחיחה ברובה, לחות מספקת ליצירת עננות ערמתית מפותחת מגיעה כאשר החלק הימי במסלול האוויר בדרכו לאזור ארוך מספיק. עם זאת, מסלול ימי אינו ערובה לגשם – גם רוח מערבית בעונת הקיץ היבשה, מביאה אוויר ימי. כדי לייצר גשם מהאוויר הימי יש להעלותו לגבהים מספיקים, שם הוא מתקרר, הלחות היחסית עולה, טיפות המים מתעבות, גבישי הקרח צומחים ואוספים טיפות מים. כשהגבישים גדלים מספיק הם נעשים כבדים מכדי להישאר באוויר ונופלים כשלג או כגבישי קרח (גראופל), ניתכים ומגיעים לקרקע לרוב בצורה של גשם. עליית אוויר שכזו יכולה להתרחש (איור 2): א. תחת מערכת מזג אוויר בסקאלה גדולה (סינופטית) המעודדת את האוויר לעלות, ב. כאשר הרוח האופקית מתנגשת במכשול טופוגרפי כמו רכס הרים המאלץ אותה לעלות כלפי מעלה, ו-ג. כאשר גוש אוויר קר דוחף למעלה גוש אוויר חם יותר – מצב שמתואר כ"חזית" של מזג אוויר פעיל.

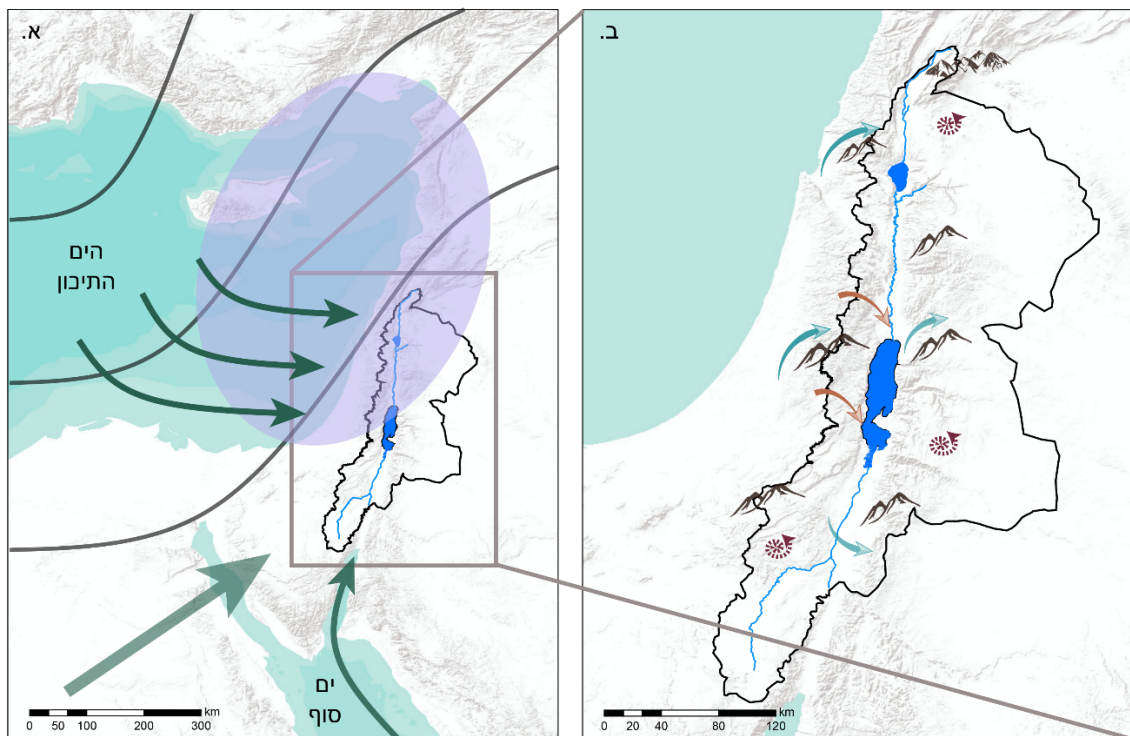
מערכות סינופטיות והתנאים המתאימים לגשם

רק חלק ממערכות מזג האוויר באזור שלנו מביאות לעליית אוויר מספיקה ומעודדות יצירת גשם. מערכות אלה יתוארו בפסקאות הבאות לפי תרומתן הכוללת לגשם באזור מזרח הים התיכון.

שקע ים תיכוני

שקעים ים תיכוניים, הידועים גם בשמות שקע קפריסאי/סורי/עזה, כתלות במיקום מרכז השקע, הם מערכת מזג האוויר המביאה את מירב הגשם – עד כ-90% מהכמות השנתית הכוללת – לצפון אגן הניקוז של ים המלח (איור 1ב'). השקעים מלווים באפיק או בשקע רום המעודד עליית אוויר בקנה מידה גדול. בקרבת הקרקע, השקעים מביאים לזרימה של אוויר קר מקווי רוחב צפוניים יותר אל מעל לים התיכון החמים ומגבירים את אספקת הלחות מהים (איור 2).

הדפוס המרחבי של הגשם במהלך שקע ים תיכוני יוצר את מפת הגשם השנתית – כמויות הגשם גדלות לכיוון צפון מערב, נמוכות בבקע ים המלח ובנגב ועולות לכיוון הרי ירדן. האזורים הצפון-מערביים מקבלים זרימה ימית ארוכה וממושכת וקרובים יותר למרכזו של אפיק הרום. לכן עליית האוויר וכמות הלחות בהם גבוהות יותר. יחד, שני הגורמים הללו מייצרים עננות ערמתית מפותחת ומגבירים את עוצמות הגשם ואת כמותו. לקראת סוף המערכת, כשהשקע מתקדם לכיוון מזרח, כיוון הרוח המגיעה לאזור משתנה: הרוח חגה לצפון-מערבית, האוויר מתקרר, וגם אזורים דרומיים ומזרחיים יותר מקבלים גשם. חిגת רוח זו בקרקע מלווה לרוב באינוורסיית רום (איור 3א'-ב'). האינוורסיה הזאת מהווה מעין חסם עליון להתפתחות העננות, שנתחמת בחלקה התחתון של האטמוספירה. לכן, כשהגשם מגיע לאזורים הדרום-מזרחיים, העננות משנה את אופייה והופכת ליותר שכבתית ורדודה ועוצמת הגשם פחותה. ההפחתה בכמויות המשקעים מזרחית לקו פרשת המים קשורה גם להתייבשות של האוויר עם הירידה בגובה. לכן המתאם בין מספר הימים בשנה שבהם יש שקע ים תיכוני ובין כמות הגשם השנתית דועך דרום-מזרחה: מכ-0.7 בצפון ל-0.4 בשדה בוקר, ולערכים נמוכים מאוד ולא מובהקים במדבר יהודה ובירדן (איור 4).



איור 2: הגורמים המטאורולוגיים לגשם באזור אגן הניקוז של ים המלח. א. אפיק ברום (אפור) ובקדמתו אזור עם עליית אוויר חזקה (סגול) שבו יורד מרב הגשם. כשהאפיק מדרים עוד, גם האזור הגשום מדרים. הסעת הלחות למערכת הגשם השונות מסומנת בירוק. ב. גורמים מקומיים המשפיעים על הגשם. עליית אוויר באזור ההרים מביאה להגברת הגשמים, והירידה שלו ממזרח להרים מפחיתה אותם. בזמן אפיק ים סוף אופיו של הגשם מקומי והוא מושפע מעליית אוויר בקנה מידה קטן בשל חימום של הקרקע בעיקר באזורים המזרחיים (מסומן כחץ חום מגולגל).

אפיקים סוף

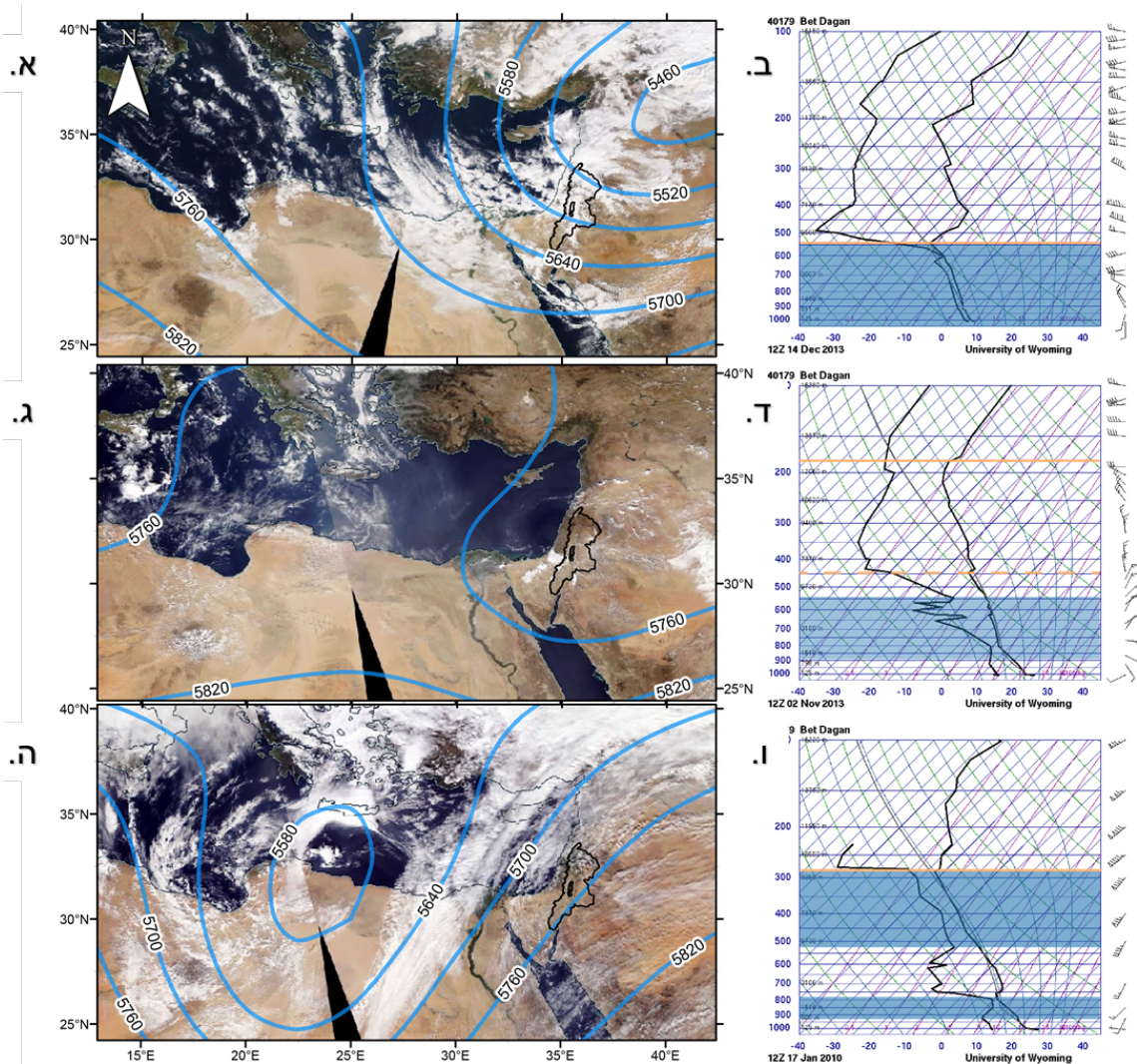
אפיקים מים סוף שוררים באזור שלנו במשך כמאה ימים בשנה והם דומיננטיים בעיקר בסתיו. עם זאת, רק מקצתם הופכים לאפיקים פעילים, כלומר – ממטירים משמעותית באזור. האפיקים הפעילים מלווים באפיק רום דרומי יחסית המספק את התמיכה הנדרשת לעליית האוויר. במהלך ההופעה של אפיקים סוף, האוויר בקרבת הקרקע מאופיין בזרימות חמות ויבשות מכיוון דרום-מזרח, ממזרח לציר האפיק, וזרימות צפוניות קרירות ולחות ממערב לו (איור 3ג'). לכן סוג פעילות מזג האוויר תלוי במיקומו של הציר ביחס לאזור. כשציר האפיק ממערב לאזורנו (בים התיכון) עננות פעילה יכולה להיווצר רק בגובה רב יחסית, בתנאי שהלחות מספקת ואז גשם יורד במזג אוויר חם במיוחד. במקרים כאלה, מקור הלחות יכול להיות מרוחק יחסית – אפריקה המשוונית או צפון אפריקה, למשל – או בים סוף (Armon et al., 2018). לעומת זאת, כשציר האפיק ממזרח לאזורנו (בים התיכון) עננות פעילה יכולה להיווצר רק בגובה רב יחסית, בתנאי שהלחות מספקת ואז גשם יורד במזג אוויר חם במיוחד. במקרים כאלה, מקור הלחות יכול להיות מרוחק יחסית – אפריקה המשוונית או צפון אפריקה, למשל – או בים סוף (Armon et al., 2018). לעומת זאת, כשציר האפיק ממזרח לאזורנו (בים התיכון) עננות פעילה יכולה להיווצר רק בגובה רב יחסית, בתנאי שהלחות מספקת ואז גשם יורד במזג אוויר חם במיוחד. במקרים כאלה, מקור הלחות יכול להיות מרוחק יחסית – אפריקה המשוונית או צפון אפריקה, למשל – או בים סוף (Armon et al., 2018).

אפיק הרום הדרומי ומקור הלחות, שיכול גם הוא להיות דרומי, מביאים לכך שגשם באפיקים סוף עשוי לרדת לכל אורך אגן הניקוז של ים המלח, כולל במדבר. למעשה, הטמפרטורה הגבוהה בקרקע באזורים הדרומיים גורמת להגברת אי-היציבות האטמוספירית ועשויה להביא לעוצמות גשם גבוהות יותר באזורים אלה ביחס לאזורים הצפוניים של אגן הניקוז. לעתים אי היציבות כ"כ גדולה עד שאין אינוורסיית רום משמעותית לאורך כל הטרופוספירה (איור 3ד') – העננות הערמתית מתפתחת מאוד ועוצמות הגשם גבוהות במיוחד. יחד עם זאת, הגשם האופייני הוא גשם מקומי, ופעמים רבות רוב האזור לא חווה גשם כלל בזמן אפיקים סוף פעיל, וזאת אף שבנקודות מסוימות כמויות הגשם גבוהות במיוחד (איור 3ג'). התרומה הכוללת של אפיקים מים סוף לגשם השנתי נמוכה בחלקים הצפוניים של האגן ועולה כלפי דרום-מזרח (יותר מ-50% מהגשם באזור אילת), כלומר באזורים המושפעים פחות משקעים ים תיכוניים.

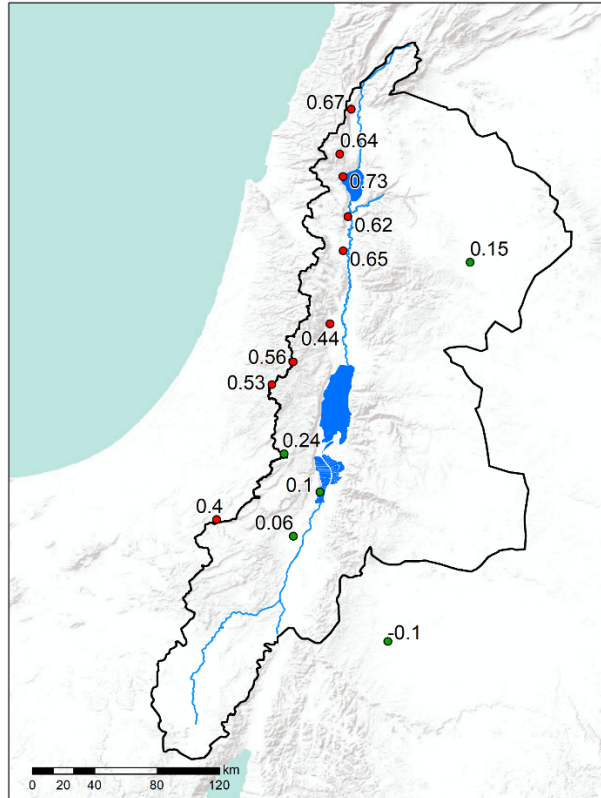
תמרה טרופית / זרם סילון פעיל

לעתים נדירות יחסית שורר בחלקים הגבוהים של האטמוספירה זרם סילון חזק במיוחד שמביא עמו עננות ממטירה ברום הבינוני והגבוה, מצב הנקרא זרם סילון פעיל או תמרה טרופית. במצב כזה חשיבותה של מערכת מזג האוויר בקרקע פחותה. זרם הסילון מביא לעליית אוויר בקנה מידה נרחב והלחות מגיעה מאזורים מרוחקים במיוחד: אפריקה המשוונית, צפון אפריקה ואפילו מזרח האוקיאנוס האטלנטי. תוספת לחות יכולה להגיע מעליית האוויר לאורך הדרך, למשל מאזור הים התיכון או ים סוף. במצבים כאלה העננות השכבתית המגיעה עם זרם הסילון (איור 3ה'-ו') גורמת לכל היותר לגשם בעוצמה קלה-בינונית אך בתוכה יכולים להופיע תאים של עננות ערמתית עם גשמים בעוצמה גבוהה.

במהלך סופות מסוג זרם סילון פעיל, עשוי לרדת גשם בכל האזור בו-זמנית. בנוסף, הריחוק ממקורות הלחות מנתק את התלות בין המרחק מהים לכמות המשקעים. לכן, כמויות גשם גדולות עשויות לרדת בעומק המדבר, ואפילו במעלה אגן נחל פארן והערבה היבשים. לעומת הדפוס האופייני לאפיק ים סוף, תמרת העננים היא ארוכה (איור 3ה') וגורמת לגשם ממושך. כתוצאה מכך, כמויות גשם גדולות (עשרות מ"מ ומעלה) מצטברות בכל רחבי אגן הניקוז של ים המלח או בשטחים נרחבים ממנו.



איור 3: מקרים לדוגמא משלוש מערכות מזג האוויר העיקריות המביאות גשם לאגן הניקוז של ים המלח. א. מפה סינופטית של הרום הגבוה (קווים כחולים; 500 מיליבר) בזמן המעבר של שקע ים תיכוני באזור (14/12/2013, בשעות הצהריים). ברקע המפה תמונת לוויין הממחישה את מיקום העננות (בלבן). בשלב זה גשם ירד בחלק גדול מאגן הניקוז של ים המלח. ב. פרופיל אנכי של הטמפרטורה והלחות כפי שנמדד באמצעות בלון מזג אוויר שהופרח בצהרי היום ע"י השירות המטאורולוגי בבית דגן. בציר האופקי – טמפרטורה, ובציר האנכי – הלחץ האטמוספרי. הקווים השחורים מייצגים את מדידות הטמפרטורה (קו ימני) וטמפרטורת נקודת הטל (קו שמאלי) בכל גובה. ככל שהקווים קרובים יותר אחד לשני כך הלחות היחסית גבוהה יותר. אזורים שבהם הלחות גבוהה מאוד ויש סיכוי להתפתחות של עננים מסומנים בכחול. אינורסיות מסומנות בכתום. ג. כמו איור א', אבל בזמן אפיק ים סוף (2/11/2013). ד. כמו איור ב', אבל לאפיק ים סוף. ה. כמו א' אבל בזמן זרם סילון פעיל (17/1/2010). תמרת העננים במרכז מצרים עושה את דרכה לכיוון אגן הניקוז של ים המלח. ו. כמו א' אבל בזרם סילון פעיל.



איור 4: ערכי המתאם בין כמות הגשם השנתית בתחנות גשם שונות באגן הניקוז של ים המלח ובקרבתו ובין מספר הימים שבהם שורר שקע ים תיכוני. תחנות שבהם המתאם מובהק סטטיסטית מסומנות באדום, והשאר בירוק. שימו לב למתאם הגבוה בחלק הצפוני והמערבי של האגן לעומת המתאם הנמוך בחלק הדרומי והמזרחי של האגן.

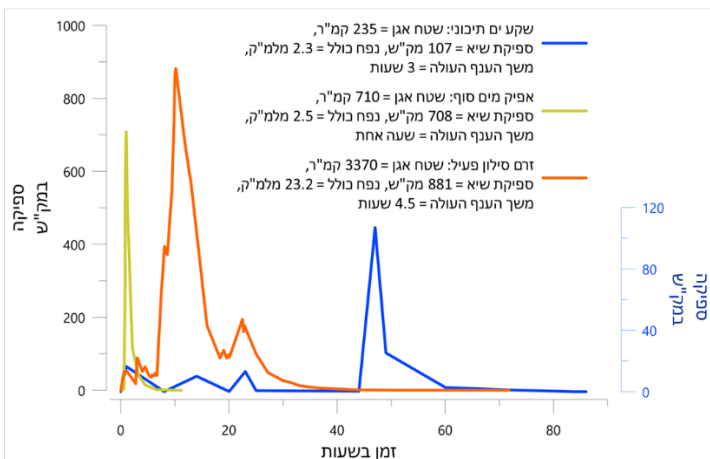
שטפונות באגן הניקוז של ים המלח

התגובה של המערכת ההידרולוגית לגשם תלויה במאפיינים העיתיים והמרחביים שלו ובנוסף במאפיינים של אגן הניקוז שעליו יורד הגשם. המאפיינים המשמעותיים של אגן הניקוז כוללים את שימושי הקרקע (התכסית), סוג ועובי הקרקע, כיסוי הצמחיה, גודל האגן ושיפועו. בין המאפיינים העיקריים של הגשם המשפיעים על השטפונות, ניתן למנות את העוצמה, הכמות, הכיסוי המרחבי והמשך של הגשם. התגובה ההידרולוגית, אם כך, תלויה בשילוב בין גורמים אלה במהלך סופה. לדוגמה, אם כמות גשם גדולה תרד בחלקו התחתון של אגן הניקוז, בשטח בעל כיסוי קרקע דק – השטפון במוצא האגן צפוי להיות עז יותר מאשר אם כמות נמוכה תרד בחלקו העליון של האגן בשטח עם קרקע עבה ומכוסת צמחיה. בנוסף, בעיקר באזורים שבהם כיסוי הקרקע והצמחיה נרחב, יש משמעות לתנאי רטיבות הקרקע לפני הסופה – אם גשם רב כבר ירד במקום והקרקע רוויה או קרובה לכך, תידרש כמות גשם פחותה ליצירת שטפון. לעומת זאת, באתרים שבהם הקרקע דקה במיוחד ועוד יותר אם אגן הניקוז מתאפיין במחשופי סלע רבים, לתנאים המוקדמים השפעה פחותה ועוצמת השטפון תלויה בעיקר בעוצמת הגשם.

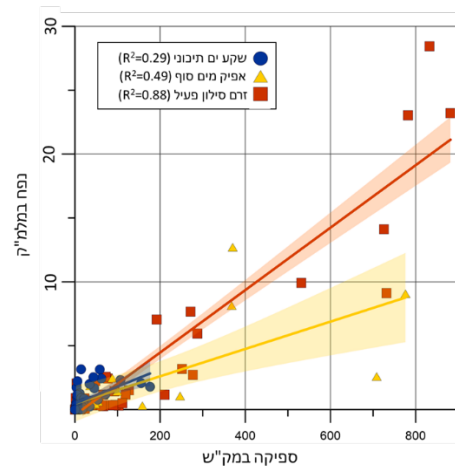
התגובה ההידרולוגית למאפייני גשם שונים

האופי השונה של מאפייני הגשם, במהלך סוגי סופות שונים מכתוב את מהלך השטפון. כמויות הגשם הגבוהות שמגיעות עם השקעים הים-תיכוניים, בעיקר לחלקים הצפוניים של האגן, גורמות לנפחי זרימה גבוהים. בדרום האגן עוצמות הגשם נמוכות והשטפונות מאופיינים לרוב בספיקות שיא נמוכות (איור 5א'). לעומת זאת, בזמן אפיקים מים סוף, אופיו המקומי של הגשם גורם לכך שכמויות הגשם הן נמוכות באופן ממוצע וכך גם נפחי הזרימה ומשכה – ובכלל, שטפונות יופיעו רק באגנים מעטים. בניגוד לכך, ספיקות השיא באגנים שכן שוטפים יכולות להיות גבוהות במיוחד (איור 5א') והיחס בין ספיקת השיא לנפח השטפון הוא גבוה יותר מאשר בשקעים ים תיכוניים (איור 5ב'). שטפונות המתרחשים בעקבות זרם סילון פעיל הם ייחודיים: גם הנפח וגם ספיקת השיא במהלכם גבוהים במיוחד (איור 5ב'). הפרישה המרחבית המשמעותית של הגשם על פני פרק זמן ארוך גורמת לאגנים רבים לזרום בו-זמנית בספיקות גבוהות שקרובות לעקום המעטפת האזורי של השטפונות. כך, השטפונות במוצאם של האגנים הגדולים ביותר, במהלך זרם סילון פעיל, הינם בעלי ספיקה ונפח גדולים ובאזורים המדבריים אלה הן הסופות היוצרות את השטפונות הגדולים ביותר (איור 5א'). בנוסף, תיעוד לוויני של שפך נחל הערבה מעשרות השנים האחרונות הראה שתמרות הסחף הגדולות ביותר הצפות על האגם במהלך שטפונות נוצרו כתוצאה מזרמי סילון פעילים.

א.



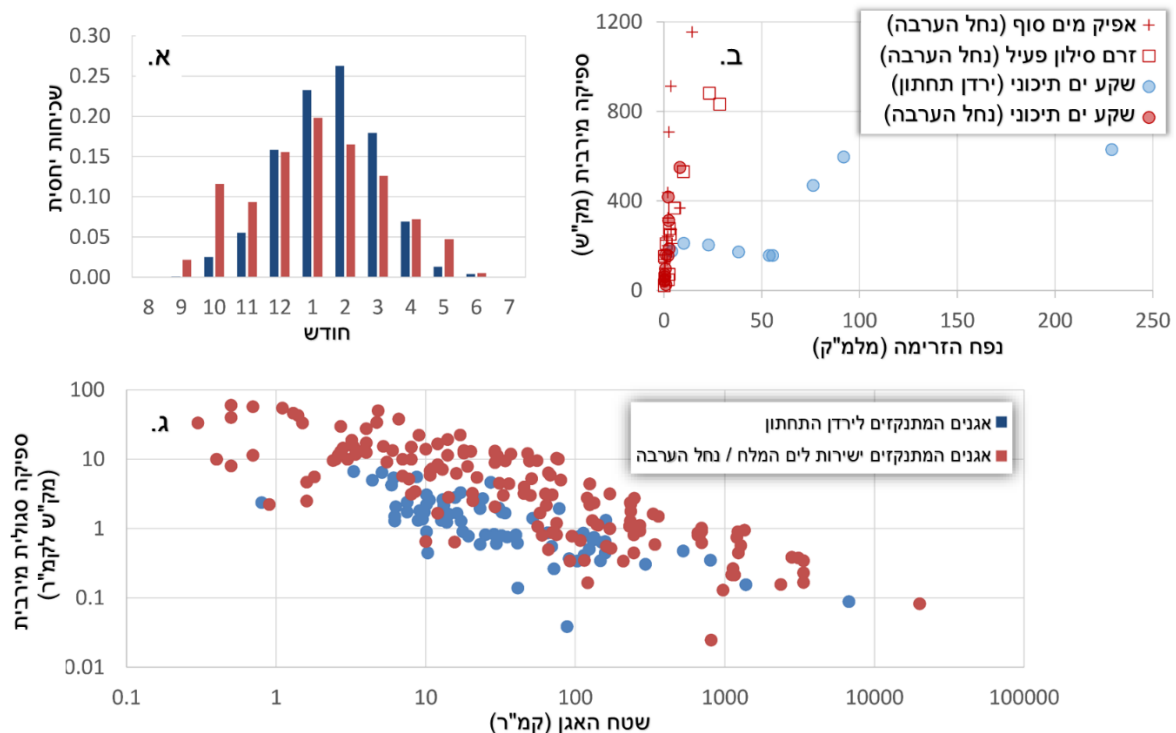
ב.



איור 5: א. הידרוגרפים (באדיבות השירות ההידרולוגי) של שטפונות ממערכות גשם שונות. שימו לב לספיקה הגבוהה (ציר אנכי ימני) בשטפון שנוצר כתוצאה משקעים ים תיכוניים לעומת השטפונות האחרים. ב. נפח השטפון במיליוני קוב (מלמ"ק) לעומת הספיקה בקוב לשניה (מק"ש) בשש סופות גשם שונות, שתיים מכל סוג של מערכת מזג אוויר.

הבדלים בתגובה ההידרולוגית בין אזורים צחיחים לים תיכוניים

ההבדלים בין מאפייני האגנים והגשם בחלקו הצפוני של אגן הניקוז של ים המלח לבין מאפיינים אלה בחלקו הדרומי מביאים לתגובה הידרולוגית שונה מאוד בין שני האזורים. ריבוי הצמחיה והקרקות העבות יחסית בחלקים הצפוניים של האגן מגדילים את התלות של שטפון בכמויות הגשם שירדו לפניו ומקטינים את התלות שלו בעוצמת הגשם הסופתית. לעומת זאת, ריבוי מחשופי סלע, שיפועים גבוהים וכמויות מעטות של צומח יוצרים תלות גדולה בין השטפונות בחלקים הדרומיים של האגן לבין עוצמות הגשם. לכן, השטפונות בחלק הצפוני מרוכזים בחודשי החורף (איור 6א') – הזמן שבו שקעים ים תיכוניים הם המערכת הדומיננטית, ואילו באזורים הדרומיים יש שטפונות רבים גם בחודשי הסתיו והאביב – כשהמערכות האחרות משחקות תפקיד משמעותי: השטפונות הגדולים באגני הניקוז הדרומיים נוצרים רובם מאפיקי ים סוף או מזרם סילון פעיל, בעוד שהשטפונות הגדולים באגנים הצפוניים נוצרים כולם משקעים ים תיכוניים (איור 6ב'). בנוסף, השטפונות באזורים הדרומיים הם בעלי יחס גבוה בין ספיקת השיא לבין הנפח, בעוד שבאגנים הצפוניים היחס נמוך בהרבה. הבדל נוסף במאפייני השטפונות בין שני האזורים מתבטא בספיקת השיא הסגולית (ספיקת השיא מחולקת בשטח האגן) – הספיקה גבוהה בהרבה בנחלים בדרום האגן ביחס לנחלים הצפוניים (איור 6ג').



איור 6: הבדלים בין שטפונות בנחלים בחלקו הצפוני (אקלים ים תיכוני) של אגן הניקוז של ים המלח (בכחול) המתנקזים לירדן הדרומי, ונחלים בחלקו הדרומי (המדברי) המתנקזים לנחל הערבה או ישירות לים המלח (באדום). א. הפיזור העונתי של השטפונות. ב. ספיקה לעומת נפח בשטפונות הגדולים ביותר בנחלים נבחרים. ג. הספיקה המרבית שנמדדה בנחלים רבים לעומת שטח אגן הניקוז של הנחלים.

מה ניתן להסיק מהתנאים בהווה על העבר

רטוב יותר = שטפוני יותר או שטפוני פחות?

החל מהמאה ה-19, ובעיקר מאז המחצית השנייה של המאה ה-20, מחקרים רבים מנסים להתמודד עם הסוגיה של הבנת אקלים העבר מתוך הרקורד הגאולוגי בים המלח ובסביבתו. בשנים האחרונות מחקרים מנסים לפענח את המערכות הסינופטיות שהשפיעו על האקלים בעבר, ואפילו את ההשפעה של מערכות ספציפיות על התגובה ההידרולוגית בקנה מידה ברמה העונתית.

הקידוח העמוק בים המלח מאפשר להבחין בשינויים ברקורד הסדימנטרי בסקאלה תוך-שנתית (עונתיות), ובשנים האחרונות זהו ברקורד הקידוח תקופות שבהן יש מספר גדול יותר של שכבות תוך-שנתיות – כלומר יותר שטפונות משמעותיים בעונה הגשומה של כל שנה, לעומת תקופות אחרות שבהן המספר קטן יותר. התדירות המוגברת של השטפונות מופיעה בתקופה רטובה יחסית בסוף הפלייסטוקן, כך שנראה שהיא קשורה לעליה בכמות הגשם הכוללת, בעוד שהתדירות הנמוכה מופיעה בתקופה יבשה המאופיינת בירידת מפלס האגם. לעומת זאת, רקורד סדימנטרי רדוד יחסית, שנלקח משולי ים המלח בסמוך לחמי עין גדי, מראה שדווקא במהלך תקופה יבשה בהולוקן נרשמה תדירות מוגברת של אירועים באגנים הקטנים המנקזים את מצוק העתקים, שזוהו כזרימות עתירות סדימנט (Debris flows).

מתוך ההבנה של המערכות הסינופטיות שפועלות בהווה, אפשר להסיק שכדי להגדיל את כמות המים הנכנסת לים המלח (או לאגם הלשון) נדרשת עליה בתדירות ו/או בעוצמה של שקעים ים תיכוניים, משום שאלה הן המערכות המספקות את כמות המים הגדולה ביותר לאגם. הגברת העוצמה של השקעים מבחינת אגן הניקוז של ים המלח, יכולה להתבטא בהדרמת מסלול השקעים – שקעים דרומיים מביאים לכיסוי מרחבי מוגבר של הגשם בעוצמות הגבוהות. תנאים כאלה מתאימים, לא רק להגברת הזרימה מהאגן הצפוני של הירדן, אלא גם לעלייה במספרם של השטפונות מנחלי מדבר יהודה והרי ירדן, ויכולים להתבטא ברקורד הסדימנטרי כעליה במספר השטפונות במקביל לעליה במפלס האגם.

לעומת זאת, עליה בתדירות ההופעה של זרימות עתירות סדימנט מהמצוקים של שולי ים המלח אינה מחייבת עליה בתדירות השקעים הים תיכוניים. מחקרים קודמים מצאו שסף הגשם הדרוש לשם יצירת זרימות משמעותיות כאלו הוא בין 40 ל-30 מ"מ לשעה למשך של כשעה. ניתוח נתוני גשם עכשוויים מראה שתדירות חזרת הגשם בסף הגבוה יותר (40 מ"מ לשעה למשך של שעה) שתדירות ההופעה שלו באזור ירושלים היא כ-300 שנים (!) באקלים הנוכחי, נחצה בממוצע באזור המדברי אחת ל-150-200 שנה ובאזור המדברי הקיצון אחת לכ-110 שנים. כלומר, ככל שהאקלים צחיח יותר כך תדירות ההופעה של סופות קיצוניות במיוחד עולה. את העליה בשכיחות הסופות הקיצוניות ניתן לשייך לטמפרטורה

הגבוהה יותר בשילוב עם ההשפעה המוגברת של אפיקי ים סוף שמגיעים מכיוון דרום. לכן אפשר לצפות שדווקא בתקופות יבשות יותר, שבהן קו המדבר עולה צפונה, ומפלס האגם יורד, נראה עליה בתדירות של הסופות הקיצוניות שרובן תהיינה מקומיות, יחד עם ירידה בכמות המשקעים הכוללת באגן הניקוז של ים המלח.

עליה בכמות הסחף השטפוני בעקבות עליה בתדירות של זרמי סילון פעילים

כמויות הסחף המגיעות לאגם בשטפונות לא ידועות. ניתן להצביע על זרמי סילון פעילים כתורמים את כמויות הסדימנט הגבוהות ביותר לאגם באירועים בודדים. יש הטוענים שאירועים מן הסוג הזה היו תכופים יותר בתקופות חמות במיוחד ולעומתם יש הטוענים שההתגברות קרתה דווקא בתקופות קרות. כדי לצמצם את גבולות הדיון, אפשר לקבוע שליצירה של גשם מזרם סילון פעיל דרושה הסעת לחות מאפריקה המשוונית או צפון אפריקה המונעת ברום הגבוה והבינוני ע"י זרם סילון חזק המכוון מדרום מערב לצפון מזרח. ניתן לטעון שעליה בכמות הלחות בזמן תקופות חמות באפריקה המשוונית תביא להגברה של מספר האירועים האלה, אך התנאי המגביל הוא דווקא מידת ההדרמה של זרם הסילון עד לקווי הרוחב שמדרום לסהרה. הדרמה כזו מתרחשת כשאפיק רום עמוק במיוחד (איור 2) נע מזרחה במרכז הים התיכון וצפון אפריקה ודווקא בזמן סופות חורפיות-אביביות ולא בזמן גשמי קיץ מוגברים בצפון אפריקה. לכן, מבלי לפתור את הדיון שהוזכר למעלה, אציע שהגברת התדירות של מערכות מן הסוג הזה, שתעלה את תפוקת הסחף הנחלי, צפויה להתרחש בתקופות עם מזג אוויר קיצוני דווקא בחורף ובאביב.

כמה מילים על עתיד הסופות באזור ים המלח

השפעת פעילות האדם על האקלים באזורנו ניכרת בעליית טמפרטורה משמעותית בעשורים האחרונים (כ-1.5 מעלות מאז קום המדינה), ושינוי במשטר המשקעים שקשה הרבה יותר לכמת אותו. סדרת מחקרים מהשנים האחרונות מראה שאם ההתחממות תימשך מגמת השינוי תתבטא במספר מאפיינים. בקצרה: א. מספר ימי הגשם יקטן, ב. כמות הגשם השנתית והסופתית תרד, ג. התדירות של שקעים ים-תיכוניים תפחת, ד. החורפים יתקצרו, ה. תעלה התדירות של אפיקי ים סוף (לא בהכרח של האפיקים הפעילים), ו. השטח שעליו יורד הגשם במהלך סופה יורד בצורה משמעותית, ו-ז. עוצמות הגשם במקומות שבהם יורד גשם יעלו (Armon et al., 2022). שינויים אלה צפויים להביא לירידה משמעותית בכמות המים שזורמת באופן טבעי לכיוון ים המלח מחד, ואולי לעליה בתדירות של אירועים קיצוניים כמו זרימות על גבי המצוקים בשולי ים המלח. מחקרים שמשלבים בין הבנה של התנאים האקלימיים בעבר

לבין מתן תחזיות לעתיד צריכים להתבסס על הידע שלנו מההווה, והם יעזרו לנו להיערך טוב יותר לשינויים הצפויים בעקבות ההתחממות העולמית.

סיכום

כדי להבין טוב יותר את האקלים באזורנו בעבר וכדי לתת פרשנויות סבירות לתצפיות מהרקורד הגיאולוגי עלינו להכיר את מערכות מזג האוויר הפועלות בהווה ואת התגובה של המערכת ההידרולוגית-סדימנטולוגית להן. מאמר זה מסכם את הגורמים ההידרומטאורולוגיים שמבדילים בין סוגי הסופות שמביאות לגשם ולשטפונות באגן הניקוז של ים המלח. הצבענו על שקעים ים תיכוניים כספקי המים העיקריים לאגן הניקוז של ים המלח, בעוד שאפיקים מים סוף תורמים בעיקר שטפונות מקומיים בעלי ספיקה גבוהה, וזרמי סילון פעילים שהם יחסית נדירים בהווה מביאים לשטפונות בנחלים רבים במקביל ואיתם כמויות גבוהות של מים וסדימנט. סיכמנו בקצרה גם את הגורם שמאפיין ומאחד את כל סוגי הסופות – חדירה של אפיק רום לאזורנו. חדירה כזו מאפשרת עליית אוויר ויצירה של משקעים. כמו כן, הדגמנו את ההבדל בין שטפונות בחלק הצפוני, הים תיכוני של אגן ים המלח לבין שטפונות בחלק הדרומי והצחיח שלו. בנוסף דנו בפרשנויות של הרקורד הגיאולוגי באזור ים המלח והראינו איך אפשר להתקדם ולהסביר את הסדימנטולוגיה באמצעות ידע שנצבר על סופות עכשוויות. לבסוף סיכמנו בקצרה את התחזית לסופות העתידיות באזור ים המלח בעקבות ההתחממות העולמית.

נספחים:

- א. **אי-יציבות אטמוספירית/תרמודינמית** – מאפיין אטמוספרי שקשור בשינוי הטמפרטורה עם הגובה. ככל שהטמפרטורה חמה יותר בחלקה התחתון וקרה יותר בחלקה העליון אי היציבות גוברת. אי יציבות גבוהה מאופיינת בתנועות אנכיות של אוויר ויצירת עננות וגשם, בעוד שאי יציבות נמוכה מאופיינת במיעוט תנועות אנכיות של אוויר ודיכוי פעילות מזג אוויר.
- ב. **אינוורסיה** – אזור באטמוספירה שבו יש עליה בטמפרטורה עם הגובה, מצב שבו עליית האוויר מדוכאת באופן תרמודינמי ועננים לא יכולים להתפתח לרום גבוה יותר.
- ג. **הידרוגרף** – גרף של ספיקת המים לאורך זמן.
- ד. **הידרוטאורולוגיה** – ענף מחקר מדעי העוסק בחקר התכונות המשותפות למטאורולוגיה וההידרולוגיה.
- ה. **טרופוספירה** – השכבה התחתונה של האטמוספירה שבה מתרחשת מרב פעילות מזג האוויר.
- ו. **סינופטיקה** – ענף במטאורולוגיה העוסק במערכות מזג אוויר בקנה מידה של מאות עד אלפי ק"מ ובפרקי זמן של ימים בודדים. מפות סינופטיות מציגות את המערכות האלה ומאפשרות למשל להבין את כיווני הרוחות ולתת תחזית לפרק זמן קצר. נהוג להסתכל על מפות סינופטיות במפלסים שונים ולתאר באמצעותן את מערכות מזג האוויר בקרקע וברום.
- ז. **נגר עילי** – זרימת מים על פני הקרקע, למשל בזמן שטפון.
- ח. **עומק ענן** – ההבדל בין בסיס הענן (חלקו התחתון) לבין פסגתו. ענן עמוק יותר מסוגל להוריד גשם בעוצמות גבוהות יותר.
- ט. **ענן ערמתי (קומולוס)** – ענן הנוצר כתוצאה מעליית אוויר חזקה. עננים ערמתיים מפותחים (עמוקים) עשויים להוריד גשם בעוצמה גבוהה.
- י. **עקום מעטפת** – מדד לשיא הספיקה האפשרי, על בסיס תצפיות קודמות, לפי שטח אגן הניקוז.
- יא. **שקע / אפיק (ברומטרי)** – מערכת מזג אוויר המאופיינת בעליית אוויר ובמזג אוויר פעיל.

Armon, M., Dente, E., Smith, J. A., Enzel, Y., & Morin, E. (2018). Synoptic-scale control over modern rainfall and flood patterns in the Levant drylands with implications for past climates. *Journal of Hydrometeorology*, 19(6), 1077–1096. <https://doi.org/10.1175/JHM-D-18-0013.1>

Armon, M., Marra, F., Enzel, Y., Rostkier-Edelstein, D., & Morin, E. (2020). Radar-based characterisation of heavy precipitation in the eastern Mediterranean and its representation in a convection-permitting model. *Hydrology and Earth System Sciences*, 24(3), 1227–1249. <https://doi.org/10.5194/hess-24-1227-2020>

Armon, M., Marra, F., Enzel, Y., Rostkier-Edelstein, D., Garfinkel, C. I., Adam, O., et al. (2021). Reduced Rainfall in Future Heavy Precipitation Events Related to Decreased Rain Area Despite Increased Rain Rate. *Earth's Future*.