

ניטור שיטפונות באזורים צחיחים באמצעי חישה מרחוק: אתגרים והזדמנויות בישראל

ס' איזקסון

המרכז לחקר שיטפונות במדבר, מ״פ מדבר וים המלח

סרטי התקשרות: sivanisa@adssc.org + 972 54 4424702

ת ק צ י ר

חישה מרחוק (sensing remote) הינה כלי רב עוצמה למחקרים ולניטור סביבתי, בייחוד באזורים צחיחים. שיטפונות הם תופעה בולטת בסביבות צחיחות, עם זאת מעטים המחקרים אשר השתמשו בטכניקות חישה מרחוק כדי לנטר ולמפות שיטפונות באזורים צחיחים בכלל ובישראל בפרט. סקירה זו בוחנת את הטכניקות והחיישנים העיקריים של חישה מרחוק המשמשים לחקר שיטפונות באזורים צחיחים, ומדגישה את החשיבות והתרומה הפוטנציאלית של שימוש בדימות לוויין לצורך ניטור שיטפונות באזורים צחיחים. מטרת סקירה זו היא למפות את הפערים והמגבלות של תחום מחקר זה ובד בבד להציג את הפוטנציאל של ניטור שיטפונות באזור המדברי של ישראל באמצעי חישה מרחוק. ניתן לחלק את המחקרים על מיפוי שיטפונות על פי מועד רכישת הנתונים ביחס לשיטפון: טרום-הצפה, זמן השיטפון, לאחר הצפה. ראשית, סקירה זו תבחן את המחקרים המשתמשים בדימות לוויין קודמת לשיטפון, שמטרתם למפות אזורים מועדים לסכנת שיטפונות. בשלב הבא יידונו האפשרויות והמגבלות בצילום שיטפונות בזמן אמת, ולבסוף ייסקר השימוש בדימות לוויין מאוחרת לאירוע ודוגמאות לשימוש בשיטות שונות כמו דימות מכ"מ ואינדקסים ספקטראליים של צומח ומים על מנת להעריך את שטח ההצפה ותוואי הזרימה.

מילות מפתח:
שיטפונות
אזורים צחיחים
חישה מרחוק
ניטור שינויים בזמן

Monitoring flash floods in arid regions with remote sensing: Challenges and opportunities in Israel

S. Isaacson

Desert Flood Research Center, Dead Sea-Arava Science Center (DSASC), Israel

Correspondence: sivanisa@adssc.org + 972 54 4424702

ABSTRACT

Keywords:
Flash floods
Arid regions
Remote sensing
Change detection monitoring

Remote sensing (RS) is a powerful tool for environmental studies and monitoring, particularly in arid regions. Flash floods are a prominent phenomenon in arid environments, yet few studies used RS to map and evaluate flash flood in arid regions and in Israel in particular. This review examines the current RS techniques and sensors that are used for flash flood studies in arid regions and highlight the importance and potential contribution of monitoring flash floods in arid regions by satellite images. The aim of this review is to map the gaps and limitations of this research field as well as to introduce the potential and capabilities of using remote sensing for flash floods monitoring in the desert part of Israel. Studies on mapping flash floods can be divided according to the timing of the data acquisition relative to the flood: pre-flood, co-flood, post-flood. First, this review will examine the pre-flood image studies that aim to map flash flood hazard's locations. Next, the possibilities and limitations of capturing flash floods from RS sensors in real-time will be discussed. Last, different RS methods for post flood mapping of flow extent will be reviewed, such as SAR and spectral indices of water and vegetation.

1. מבוא

1.1 הישה מרחוק באזורים צחיחים

אזורים צחיחים משתרעים על שטחים גדולים עם גישה מוגבלת ומאתגרת (Dall'Olmo and Karnieli, 2002). לכן סקרי שדה ומדידות קרקעיות באזורים אלה דורשים זמן רב, נוסף למאמצים פיננסיים ולוגיסטיים. הישה מרחוק היא כלי יעיל להתגבר על קשיים אלה (Dall'Olmo and Karnieli, 2002; Tueller, 1987). יתר על כן, סקרי שדה מוגבלים בהיקף המרחבי שלהם ובמספר הדגימות, ולכן מחקרים משתמשים לעיתים קרובות באקסטרפולציה. עם זאת אינטרפולציה מרחבית ואקסטרפולציה באזורים בעלי שונות רבה כגון מדבריות יהיו בעלי דיוק ואמינות נמוכים. מדבריות מאופיינים בשונות מרחבית וטמפורלית גבוהה של משקעים, וכתוצאה מכך בשונות מרחבית-טמפורלית גבוהה של תפוצת שיטפונות וכן כיסוי צומח (Noy-Meir, 1973, 1985). אגני ניקוז סמוכים או אפילו ערוצים סמוכים בתוך אגן יחיד עשויים להיות שונים באופן משמעותי ובלתי צפוי במספר השיטפונות בשנה (Morin and Yakir, 2014). יתר על כן, דגמים גיאומורפולוגיים שכיחים כמו מניפות סחף וערוצים מדגם פזרות, נתונים לעיתים קרובות לשיעורים גבוהים של הובלת משקעים ולשינויים מורפולוגיים, מה שגורם לשינויים תכופים בתוואי הזרימה (Ashmore, 1991). הכיסוי המרחבי המלא שמספקת דימות לוויין, מועיל בייחוד באזורים צחיחים על מנת לתעד את השונות המרחבית ולאפיין אותה וכדי להימנע משימוש בשיטות אינטרפולציה (Eisfelder et al., 2012). שיטות ניטור הישה מרחוק יעילות במיוחד באזורים צחיחים בגלל השמיים הנקיים לרוב מעננים, המאפשרים רזולוציה טמפורלית גבוהה וניטור רציף לאורך כל עונות השנה (Tueller, 1987). לפיכך זהו כלי רב-עוצמה לניטור באזורים צחיחים, שבהם הגישה הפיזית מוגבלת וניטור קרקעי ארוך-טווח נדיר ביותר.

1.2 ניטור אירועי שיטפונות בישראל: פערי ידע ומוטיבציה

במרחב המדברי בישראל מבוצעים כיום כמה מערכי ניטור שיטפונות של גופים שונים הפועלים במקביל ובטכניקות שונות: (1) תחנות הידרומטריות של רשות המים, השירות ההידרולוגי, ממקמות בכ-40 נחלים במרחב המדברי, בעיקר בנחלים הגדולים. תחנות אלו מודדות מפלס באמצעות חיישני לחץ, ומהן ניתן לחשב נפחים וספיקות נוסף לתפרוסת ולתדירות; (2) ניטור ויזואלי-קרקעי של המרכז לחקר שיטפונות במדבר (מו"פ מדבר וים המלח) ב-105 מפגשי נחל כביש. הניטור מתקיים בימים שלאחר כל אירוע זרימה, כאשר המדווחים מסיירים בנקודות קבועות ובוחנים על פי עדויות בשטח היכן התרחשה זרימה, ומעריכים את רמת הזרימה הערכה איכותנית לאחת מארבע קטגוריות (ללא זרימה, זרימה חלשה, זרימה בינונית, זרימה חזקה) (ארמוזה ואחרים, 2017, 2018, 2019, 2020); (3) התחנה לחקר הסחף באגף לשימור קרקע וניקוז במשרד החקלאות ופיתוח הכפר. יחידה זו מתמקדת בניתוחי אירועים חריגים, שבהם מעריכים ספיקות שיא בכמה נחלים נבחרים באמצעים שונים, ביניהם סימני שיא ומדידות שדה (משרד החקלאות ופיתוח הכפר, ללא תאריך); (4) מחקרים אקדמיים, הפעילים בנחלים בודדים בלבד ומספקים תצפיות ואף מדידות הידרומטריות; (5) תצפיות של הציבור הרחב המפורסמות בפורומים ברשתות החברתיות (רודפי שלום, שלוה ושיטפונות, ללא תאריך). המערך הטכני של שמירה על תקינות התחנות וכן המאמץ הלוגיסטי הכרוך באיסוף הנתונים רב מאוד. טבלה 1 מרכזת את מאפייני הניטור הקרקעי של השיטות העיקריות לעומת אפשרות של ניטור באמצעי הישה מרחוק. למיטב ידיעתנו לא קיים בישראל ובאזורים צחיחים בכלל, ניטור עקיב של שיטפונות בזק באמצעי הישה מרחוק.

טבלה 1: מאפיינים של ניטורי השיטפונות הקרקעיים המקובלים היום במרחב המדברי של ישראל ואפשרות של ניטור הישה מרחוק

כיסוי מרחבי	רזולוציה מרחבית	כיסוי עיתי	רזולוציה עיתית	יכולת ואיכות זיהוי השיטפון
תחנות הידרומטריות	מוגבל לנחלים ספורים שבהם הוצבו תחנות ולנקודה הספציפית שהם מוצבים בהם.	מדויק לנקודה בודדת.	גבוהה = דקות	גבוהה. ייתכנו תקלות טכניות שבהן ערוץ הזרימה הפעיל אינו הערוץ שבו מוצב הדוגם.
ניטור קרקעי תצפיתי	מוגבל לנקודות ספציפיות שבהן נערכות התצפיות (מפגש נחל-כביש).	מדויק לנקודה בודדת.	מבוססת אירוע סערה. תצפית אחת לאחר כל אירוע. לעיתים לא ניתן להפריד בין שני אירועים סמוכים.	כיוון בינונית. כיוון שהתצפית נעשית לאחר השיטפון. תיתכן אינטרפולציה שגויה של עדויות זרימה.
ניטור באמצעות דימות לוויין*	מלא ורציף	החל מ-20 מטר לפיקסל ללוויינים בעלי ערוץ אינפרה אדום בינוני.	על פי זמן תחילת משימת הצילום של הלוויין הרלוונטי. דימות לוויינית LANDSAT הרלוונטית למשימה זו קיימת משנות השבעים.	גבוהה ככל שתיעוד הלוויין בוצע מיידית בזמן או לאחר האירוע, יורדת ככל שמשך הזמן בין האירוע לתיעוד גדל.

* לוויינים שמצלמים באופן עקיב ולא רק על פי דרישה.

נוסף לנתוני הטופוגרפיה, גם לתכנית הקרקע השפעה על ההידרולוגיה, ולכן מודלים הידרולוגיים רבים משלבים שימוש בדימות לוויין וחלוקה קטגוריאלית של כיסויי קרקע באגן הניקוז. החלוקה לכיסויי קרקע נעשית באמצעות אלגוריתם מיון מונחה (Foody et al., 2004) ומיון לא מונחה (Mohamed and El-Raey, 2020) לדימות הלוויין. נוסף לכך תכונות קרקע שנאספו בדגימות שדה שולבו אף הן במיון תכנית על מנת להגדיר במודל יחידות עם חזירות קרקע שונה באגן הניקוז, ובכך לחזות אזורים שבהם סיכון גבוה לספיקות שיא גבוהות (Foody et al., 2004).

בעוד מודלים מבוססי טופוגרפיה ומיון תכנית מתייחסים למרכיבים קבועים במרחב ובזמן, ניתן לשלב גם נתוני תפוסת גשם על מנת לחזות אזורים פגיעים בעבור אירוע סערה מסוים (Mohamed and El-Raey, 2020). מודל מסוג זה הוא מודל דינמי, ומאפשר בחינה של תרחישי גשם אפשריים ושל השפעתם על האזורים המועדים לסיכונים שיטפונות.

המודלים ההידרולוגיים מסייעים בזיהוי אזורים פגיעים לספיקה גבוהה וכן לחיזוי הידרוגרף הסופה (Foody et al., 2004). תשומת לב מיוחדת ניתנת למיקומים פגיעים של תשתיות (Abd El Aal et al., 2019) וכבישים (Foody et al., 2004; Theilen-Willige et al., 2011; Youssef et al., 2015). האימות הקרקעי של תוצרי המודלים ומפות הסיכונים מבוצע על ידי השוואה לנתוני תחנות הידרולוגיות (Walker et al., 2019) ועל ידי עדויות מתצפיות לפגיעה בתשתיות (Foody et al., 2004).

3. מיפוי בזמן שיטפון - ניטור שיטפונות

למעקב וניטור של אירועי שיטפונות חשיבות גבוהה לצורך בניית בסיס נתונים להערכת סיכונים ואימות מודלים, להערכת התרומה למי התהום וכן להבנה של ההשפעה האקולוגית. עם זאת, קיים קושי לנטר שיטפונות על ידי תצפיות שדה קלסיות בשל אופיים הבלתי צפוי ומשכם הקצר, וכן בשל נדירות האירועים ורנדומליות הופעתם (Borga et al., 2008). שיטפונות באזורים צחיחים נמשכים לרוב בין שעות ספורות לימים אחדים. לכן, על מנת לבצע ניטור רציף של שיטפונות מהחלל ולתעד כל שיטפון באמצעות דימות לוויין, יש צורך בזמן חזרה קצר למדי של יום אחד ואף פחות מכך.

הסנסורים המשמשים לאיסוף הנתונים בחישה מרחוק יכולים להיות מוצבים על פלטפורמות שונות כמו לוויינים, מטוסים ורחפנים. אחד ההבדלים המהותיים לניטור שיטפונות בין הפלטפורמות השונות הוא יכולת הניטור העקיב לאורך זמן. מרבית לווייני החישה מרחוק מצלמים באופן תדיר כל פעם שהלוויין חולף מעל האתר הנבחר. לוויינים שמצלמים רק על פי דרישה, שהם על פי רוב בעלי יכולות ביצוע גבוהות כמו רזולוציות מרחביות וכיסוי ספקטרי (דוגמת world-view-3), אינם רלוונטיים לניטור שיטפונות בזמן, לא בזמן אמת ואף לא בימים העוקבים לשיטפון, שכן הזמנת הצילום מתבצעת חודשים מראש (תקשורת עם נציג חברת digitalglobe בישראל).

צילום רציף מלוויינים מבוצע על ידי לוויינים הנמצאים במסלול גיאוסטציונרי, המצלמים מעל נקודה קבועה (Liang et al., 2019), אך לוויינים אלו הם בעלי רזולוציה מרחבית נמוכה (500 מטר לפיקסל

מחסור בנתונים הידרולוגיים באזורים צחיחים הוא גורם מגביל החיוני לחיזוי אתרים הפגיעים לשיטפון וכן להבנת השפעות הידרו-אקולוגיות בסביבה הצחיחה. רוב אגני הניקוז מחוסרי תחנות הידרומטריות או כל כלי ניטור אחר. תחנות מטאורולוגיות ספורות מפוזרות במרחב עצום, ולכן אינן אפקטיביות בתיעוד השונות הגבוהה של נתוני המשקעים והתגובה ההידרולוגית. באופן מסורתי, הערכה של שיטפון באתרים ללא מכשור מדידה נאספת בעיקר על ידי אומדן עקיף של ספיקת השיא, על ידי איתור עדויות שנותרו על ידי מים וסדימנטים (Borga et al., 2008). מידע זה אומנם חיוני לצורך חישוב עקומות מעטפות של ספיקות שיא אזוריות, אך הוא חושף רק את המקסימום של ספיקת השיטפון, וחסר פרמטרים הידרולוגיים אחרים המתארים תגובה הידרולוגית מרחבית-זמנית מפורטת. הן מדידת השיטפונות על ידי הצבת תחנות הידרומטריות והן הערכה של ספיקות שיא בשיטפונות קדומים, מספקות מידע מרחבי נקודתי בלבד ודורשות מאמץ לוגיסטי רב.

2. מיפוי טרום-שיטפון: הערכת סיכונים ופיתוח מודלים הידרולוגיים

מרבית העבודות שפורסמו על מחקרי שיטפון באזורים צחיחים באמצעי חישה מרחוק, עוסקות בהערכת סיכונים ומיפוי של אזורי רגישות לשיטפונות. מחקרים אלה אינם ממפים או מנטרים את השיטפון עצמו, אלא משתמשים בטופוגרפיה ובפרמטרים נוספים של כיסוי קרקע במטרה לחזות את תגובת האתר לאירוע משקעים, לזהות אזורי סיכון גבוהים ולהגדירם. מודלים הידרולוגיים מתבססים על נתונים שנאספים באמצעי חישה מרחוק.

מחקרים אחדים פיתחו אלגוריתמים למיפוי נחלי אכזב מדבריים מנתוני חישה מרחוק (Hamada et al., 2016; Svoray, 2004). עם זאת אף לא אחת מהטכניקות הללו ניסתה לנטר ולמפות את הדינמיקה של אירועי הזרימה, אלא מיפתה את כל רשת הערוצים, כולל ערוצים ומקטעי ערוצים פעילים ולא פעילים כאחד.

מיפוי טופוגרפי הוא נתון בסיסי והכרחי עבור מודלים הידרולוגיים ומיפוי סיכונים שיטפונות. בהתבסס על שריג גבהים דיגיטלי (DEM), ניתן ליצור כמה מפות כגון גובה, שיפוע ומפנה. שימוש בסט כלים הידרומטריים ממ"גי (GIS) על מפות אלה, מאפשר לחלץ פרמטרים מורפומטריים של אגני הניקוז, הכוללים את מערכת הערוצים וכן מיפוי של פוטנציאל הזרימה ועוצמתה (Abd El Aal et al., 2019); זמין בגישה חופשית עבור מחקרי שיטפונות בוצע מחיישנים אחדים, כגון אלה: ASTER (Advanced Spaceborne Thermal (1) Emission and Reflection Radiometer) (Abd El Aal et al., 2019; Mohamed and El-Raey, 2020); (2) SRTM (Shuttle Radar Topographic Mission) (Youssef et al., 2011); (3) ALOS (Advanced Land Observing Satellite). לכל אותם DEM עם גישה פתוחה יש רזולוציה מרחבית של 30 מטר. שריג הגבהים של ALOS נמצא כבעל ביצועים טובים יותר מ-SRTM לשימוש במודלים של שיטפונות (Courtney et al., 2019).

ל-130 ננו-לוויינים שעליהם מוצב סנסור זהה בעל רזולוציה מרחבית של כ-3 מטר לפיקסל.

זמני החזרה של סנסורים שבהם משתמשים תכופות במחקרי ניטור שינויים, נעים בין פעמיים ביום בתנאים מסוימים לפעם ב-16 ימים, שהם זמן החזרה של הלוויין Landsat-8 (Zhu, 2017). יש לזכור שגם במקרים שבהם הלוויין חולף בדיוק בזמן השיטפון, קיימת סבירות גבוהה לעננות שתסתיר את אזור השיטפון. פתרון לעננות זו הוא בצילום בלווייני מכ"ם בתחום המיקרוגל החודר עננים (פירוט בפרק 4.1), מסיבות אלו: משך הזמן הקצר של שיטפונות באזורים צחיחים והיעדר צילום רציף ברזולוציות ובתחומים ספקטראליים רלוונטיים; ניטור עקיב של שיטפונות מהחלל עשוי להצליח רק באמצעות דימות לוויין מאוחרת לאירוע, שתתעד סיגנל המעיד על השיטפון כמו הסיגנל הצמחי או לחות הקרקע (טבלה 2).

לאחרונה מתפתח שימוש ברחפנים לצורך מדידות הידרומטריות בזמן שיטפונות בזק (Perks et al., 2016). עם זאת רחפנים מוגבלים בשטח כיסוי מצומצם וזמן טיסה קצר, ולכן אינם פתרון לניטור שיטפונות בשטחים נרחבים. הצעות לניטור רציף של שיטפונות בזמן אמת מציעות לעשות שימוש בכלי טיס בלתי מאוישים (כטב"מ), שיכולים לסרוק שטח נרחב. מערכת כזו הכוללת כטב"מ, תעלה לאוויר בזמן סערה ותפזר מיקרו-חיישנים ייעודיים לתוך ערוצי זרימה. החיישנים ימדדו את נתוני הזרימה וישדרו חזרה לכטב"מ את הנתונים (Abdelkader et al., 2013).

ויותר), ולכן יכולים להתאים לניטור שיטפונות רק במקרים של שטחי הצפה נרחבים במיוחד, אשר כמעט שלא קיימים במרחב המדברי בישראל.

מרבית לווייני החישה מרחוק ממוקמים במסלול פולארי. במסלול זה הלוויינים מקיפים את כדור הארץ, וזמן החזרה נקבע בהתאם למסלול הלוויין, לנקודה על כדור הארץ והמפתח הזוויתי של הסנסור. כאשר משוגרים סנסורים זהים על לוויינים שונים, הדבר מקצר את זמן החזרה בצורה משמעותית, שכן אין משמעות לכך שמדובר בפלטפורמות שונות כל עוד הסנסור זהה (בתנאי שהסנסורים מכילים זה לזה) (Ose et al., 2016). דוגמה לכך היא הסנסור MODIS המוצב על שני לוויינים Aqua ו-Terra. בזכות צמד הלוויינים זמן החזרה של הסנסור נע בין יום ליומיים ומשמש במחקרים רבים לניטור שינויים (Zhan et al., 2002). עם זאת הרזולוציה המרחבית של MODIS היא 250 מטר לפיקסל, ולכן באזורים צחיחים ניטור שיטפונות באמצעות חיישן זה נעשה במישורי הצפה רחבים (Gao et al., 2018; Mohammadi et al., 2017; Notti et al., 2018) ושפכי נהרות (Wolski et al., 2017). זמן החזרה הגבוה של MODIS מתאפשר תודות לשילוב של צמד לוויינים, וכן מפתח זוויתי רחב של הסנסור בא על חשבון הרזולוציה המרחבית של הדימות. פתרון חדשני המאפשר זמן חזרה גבוה בשילוב רזולוציה מרחבית גבוהה הוא מערך (constellation) הלוויינים PlanetScope, הכולל מעל

טבלה 2: תכונות שיטפונות בזק באזורים צחיחים והשפעתם על התאמת הכלים ושיטות חישה מרחוק לניטורם. פירוט המגבלות ואפשרויות לפתרון

מיום עכורים	משך הזרימה קצר		לא צפוי בזמן ובמרחב	תכונות שיטפון בזק	
	מס' שעות עד ימים בודדים		לא ניתן לחיזוי זמן רב מראש		
הסיגנל הספקטראלי לא דומה לסיגנל של מים פתוחים					
אינדקסים ספקטראליים של מים פתוחים לא רלוונטיים	הזמן שחולף מסיום השיטפון ועד הגעת הלוויין משמעותי ליכולת הניטור. עננות בזמן השיטפון אינה מאפשרת צילום		רחפנים וצילום לוויין לפי דרישה, לא רלוונטיים	מגבלות	
פיתוח אינדקסים ייחודיים	מכ"ם חודר עננים	ניטור סיגנל לאחר שיטפון	רזולוציה טמפורלית גבוהה	שימוש בניטור רציף של לוויינים	פתרון נדרש
אינדקסים של מים עכורים או אינדקסים של לחות קרקע	ניטור שינויים של תזוזה בתשתית הערוץ (InSAR)	ניטור השפעה על צומח באמצעות אינדקסי צמחיה - ניטור השינוי בלחות הקרקע	רביבו לוויינים: - פלטפורמות עם סנסור זהה - מערך ננו לוויינים - היתוך מידע רב-חיישני	לוויינים במסלול גיאוסטיונרי	שיטות אפשריות לפתרון
ניטור המים מחייב צילום בזמן אמת	רזולוציה טמפורלית בינונית	ניטור שינויים תלוי בעוצמת השיטפון ובמשך השיטפון	רזולוציה מרחבית נמוכה (מעל 500 מטר לפיקסל)		מגבלות של הפתרון המוצע

4. מיפוי לאחר שיטפון: ניטור שיטפונות

4.1 שימוש בגלי מיקרו במכ"מ

מכיוון שמי השיטפונות עשירים בדרך כלל בסדימנטים, החתימה הספקטרלית של פני המים אינה דומה לחתימה ספקטרלית אופיינית של גופי מים. לכן אינדקסים ספקטראליים מקובלים של מים אינם יעילים לזיהוי זרימת שיטפונות באזורים צחיחים (Walker et al., 2019). על מנת לאתר אזורים המועדים לשיטפונות, נתוני מכ"מ שימשו לזיהוי אזורים מוצפים עם תמונות Sentinel-1, שנרכשו במהלך אירוע שיטפון או מעט אחריו (Theilen-Willige and Wenzel, 2019). דימות מכ"מ אינה רגישה לעננים, ולכן רכישת הדימות נעשית בכל מזג אוויר. יכולת זו בשילוב הרגישות הגבוהה של מכ"מ למיפוי מים בפני השטח, מביאה לשימוש נרחב בדימות מכ"מ לניטור שיטפונות ושטחי הצפה (Schumann and Moller, 2015). עם זאת בשיטפונות בזק באזורים צחיחים המים לא נשארים כאמור על פני השטח למשך זמן רב, ולכן השימוש בדימות מכ"מ לצורך ניטור שיטפונות באזורים אלו יכול להיעשות על ידי ניטור השינויים הנגרמים מהשיטפון, ולא תיעוד הזרימה עצמה. מדידת התאבכות של גלי מכ"מ (InSAR) היא שיטה לניטור תזוזות זעירות בפני השטח על ידי השוואת שתי מדידות של דימות מכ"מ שנלקחו בזמנים שונים. שיטפונות בזק גורמים לתזוזה בתשתית הערוצים, אשר יכולה להיות מנוטרת באמצעות טכנולוגיה זו ולהעיד על שיטפון (Schepanski et al., 2012).

4.2 אינדקסים ספקטראליים של מים וצומח

עדויות לשינויים בתוואי הזרימה בנחל קטורה שבערבה הדרומית התקבלו באופן לא שגרתי על ידי עיבוד נתוני חישה מרחוק של עצי השיטים בנחל (Isaacson et al., 2017). השיטה השוותה בין גודל העצים ומצב הבריאות של עלוות העצים, כפי שנמדד באינדקס צומח ספקטראלי (NDVI). מאחר שמים הם הגורם המגביל הראשון באזורים צחיחים, לשיטפונות באזורים אלו השפעה מכרעת על הן על צומח חד-שנתי והן על צומח רב-שנתי, ותפרוסת הצמחייה מוגבלת ברוב המקרים לוואדיות (Noy-Meir 1973). מחקרים אחרים שהשתמשו בסיגנל הצמחי בדימות לוויין על מנת להעריך את תפרוסת השיטפונות, נערכו באזורים צחיחים למחצה שבהם שטחי ההצפה נרחבים והשיטפונות אינם שיטפונות בזק (flash-floods), אלא נמשכים לאורך תקופה של שבועות עד חודשים, ואינם אופייניים לישראל. מחקרים אלו עשו שימוש באינדקסים ספקטראליים של צומח, והשתמשו בתגובה הצמחית לשיטפונות על מנת לזהות את תחום השפעתו (Mohammadi et al., 2017; Powell et al., 2014; Wolski et al., 2017).

בעוד ניטור צומח בחישה מרחוק נעשה לרוב באמצעות אורכי גל בתחום האור הנראה והאינפרא אדום הקרוב, תחום האינפרא אדום הבינוני משמש להערכת תכולת מים בצומח או בקרקע (Yuan et al., 2019). אף על פי כן לא ידועים לנו מחקרים שהשתמשו בתחום זה לצורך ניטור רציף ועקיב של אירועי זרימה באזורים צחיחים.

5. מסקנות וסיכום

קיימת חשיבות רבה לניטור רציף ועקיב של שיטפונות באזורים צחיחים. בישראל צפיפות נקודות הדיגום וניטור השיטפונות היא מהגבוהות בעולם, ודורשת מאמץ כלכלי ולוגיסטי רב. חישה מרחוק היא כלי רב-עוצמה שיכול לשמש לניטור שיטפונות באזורים צחיחים. כלי זה נתון למגבלות. עם זאת הפיתוח הטכנולוגי המואץ של תחום זה והורדת עלויות ניכרת בשנים האחרונות כתוצאה מפיתוח של מיקרו וננו לוויינים, מביאים לקצב גבוה של שיפורים בביצועים של הכיסי והניטור של כדור הארץ מהחלל (earth observation).

מאמר זה מציג קווים כלליים של היכולות והמגבלות של כלי החישה מרחוק לצורך משימת ניטור שיטפונות באזורים צחיחים, וסוקר מחקרים שבוצעו באזורים שונים בעולם להערכת הנזק הפוטנציאלי משיטפונות או למדידת תפרוסת השיטפונות והשפעתם. ניטור שיטפונות ומדידות הידרומטריות באמצעי חישה מרחוק מבוצעים בעולם בשנים האחרונות באופן נרחב שאף שהולך וגובר, אך שיטפונות בזק באזורים צחיחים בכלל ובישראל בפרט, עדיין מציבים מגבלות הדורשות התאמות ופיתוח טכניקות ייחודיות.

תודות

מחקר זה מומן על ידי משרד המדע והטכנולוגיה.
מחקר זה מומן על ידי המדען הראשי משרד החקלאות.

מקורות

ארמוזה זבולוני, ר', 2017. ניטור גשם וזרימות בערבה ובנגב הדרומי: דו"ח מדעי לחורף 2016–2017, דו"ח שנתי. מרכז מדע ים המלח והערבה.

ארמוזה זבולוני, ר', שמחוב, ר', באב"ד, א', שלומי, י', עבאדי, א', שם טוב, ר', גנץ, נ', נטקה-נקש, י', 2020. ניטור גשם וזרימות בערבה, בהר הנגב ובים המלח: סיכום עונת הגשמים 2019–2020. המרכז לחקר שיטפונות במדבר, מ"פ מדבר וים המלח.

משרד החקלאות ופיתוח הכפר, האגף לשימור קרקע וניקוז, ללא תאריך. https://www.moag.gov.il/yhidotmisrad/shimur_karka/Publications/Pages/default.aspx

רודפי שלום, שלוה ושיטפונות [קבוצה ציבורית פייסבוק], ללא תאריך. <https://www.facebook.com/groups/myisrael100>

Abd El Aal, A., Kamel, M., Al-Homidy, A., 2019. Using remote sensing and GIS techniques in monitoring and mitigation of geohazards in Najran Region, Saudi Arabia. *Geotechnical and Geological Engineering* 37 (5), 3673–3700. <https://doi.org/10.1007/s10706-019-00861-w>

- Liang, S., Wang, J., Jiang, B., 2019. A systematic view of remote sensing. In Liang, S., Li, X., Wang, J. (Eds.), *Advanced remote sensing: Terrestrial information extraction and applications* (2nd ed.). Academic Press. pp. 1–57. <https://doi.org/10.1016/C2017-0-03489-4>
- Mohamed, S. A., El-Raey, M. E., 2020. Vulnerability assessment for flash floods using GIS spatial modeling and remotely sensed data in El-Arish City, North Sinai, Egypt. *Natural Hazards* 102 (2), 707–728. <https://doi.org/10.1007/s11069-019-03571-x>
- Mohammadi, A., Costelloe, J. F., Ryu, D., 2017. Application of time series of remotely sensed normalized difference water, vegetation and moisture indices in characterizing flood dynamics of large-scale arid zone floodplains. *Remote Sensing of Environment* 190, 70–82. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2016.12.003>
- Morin, E., Yakir, H., 2014. Hydrological impact and potential flooding of convective rain cells in a semi-arid environment. *Hydrological Sciences Journal* 59 (7), 1353–1362. <https://doi.org/10.1080/02626667.2013.841315>
- Notti, D., Giordan, D., Calò, F., Pepe, A., Zucca, F., Galve, J. P., 2018. Potential and limitations of open satellite data for flood mapping. *Remote Sensing* 10 (11). <https://doi.org/10.3390/rs10111673>
- Noy-Meir, I., 1973. Desert ecosystems: Environment and producers. *Annual Review of Ecology and Systematics* 4 (1), 25–51. <https://doi.org/10.1146/annurev.es.04.110173.000325>
- Noy-Meir, I., 1985. Desert ecosystem structure and function. In Evenari, M., Noy-Meir, I., Woodal, D. H. (Eds.), *Hot deserts and shrubland*. Elsevier. pp. 93–104.
- Ose, K., Corpetti, T., Demagistri, L., 2016. Multispectral satellite image processing. In *Optical remote sensing of land surface: Techniques and methods*. Elsevier. pp. 58–124. <https://doi.org/10.1016/B978-1-78548-102-4.50002-8>
- Perks, M. T., Russell, A. J., Large, A. R. G., 2016. Technical note: Advances in flash flood monitoring using unmanned aerial vehicles (UAVs). *Hydrology and Earth System Sciences* 20 (10), 4005–4015. <https://doi.org/10.5194/hess-20-4005-2016>
- Powell, S. J., Jakeman, A., Croke, B., 2014. Can NDVI response indicate the effective flood extent in macrophyte dominated floodplain wetlands? *Ecological indicators* 45, 486–493. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2014.05.009>
- Abdelkader, M., Shaqura, M., Claudel, C. G., Gueaieb, W., 2013. A UAV based system for real time flash flood monitoring in desert environments using Lagrangian microsensors. *International Conference on Unmanned Aircraft Systems, ICUAS: Conference Proceedings*. pp. 25–34. <https://doi.org/10.1109/ICUAS.2013.6564670>
- Ashmore, P. E., 1991. How do gravel-bed rivers braid? *Canadian Journal of Earth Sciences* 28 (3), 326–341. <https://doi.org/10.1139/e91-030>
- Borga, M., Gaume, E., Creutin, J. D., Marchi, L., 2008. Surveying flash floods: Gauging the ungauged extremes. *Hydrological Processes* 22 (18), 3883. <https://doi.org/10.1002/hyp>
- Courty, L. G., Soriano-Monzalvo, J. C., Pedrozo-Acuña, A., 2019. Evaluation of open-access global digital elevation models (AW3D30, SRTM, and ASTER) for flood modelling purposes. *Journal of Flood Risk Management*, 12 (S1), 1–14. <https://doi.org/10.1111/jfr3.12550>
- Dall'Olmo, G., Karnieli, A., 2002. Monitoring phenological cycles of desert ecosystems using NDVI and LST data derived from NOAA-AVHRR imagery. *International Journal of Remote Sensing* 23 (19), 4055–4071. <https://doi.org/10.1080/01431160110115988>
- Eisfelder, C., Kuenzer, C., Dech, S., 2012. Derivation of biomass information for semi-arid areas using remote-sensing data. *International Journal of Remote Sensing* 33 (9), 2937–2984. <https://doi.org/10.1080/01431161.2011.620034>
- Foody, G. M., Ghoneim, E. M., Arnell, N. W., 2004. Predicting locations sensitive to flash flooding in an arid environment. *Journal of Hydrology* 292 (1–4), 48–58. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2003.12.045>
- Gao, W., Shen, Q., Zhou, Y., Li, X., 2018. Analysis of flood inundation in ungauged basins based on multi-source remote sensing data. *Environmental Monitoring and Assessment* 190 (3), 129. <https://doi.org/10.1007/s10661-018-6499-4>
- Hamada, Y., O'Connor, B. L., Orr, A. B., Wuthrich, K. K., 2016. Mapping ephemeral stream networks in desert environments using very-high-spatial-resolution multispectral remote sensing. *Journal of Arid Environments* 130, 40–48. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2016.03.005>
- Isacson, S., Ephrath, J. E., Rachmilevitch, S., Maman, S., Ginat, H., Blumberg, D. G., 2017. Long and short term population dynamics of acacia trees via remote sensing and spatial analysis: Case study in the southern Negev Desert. *Remote Sensing of Environment* 198. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.05.035>

- Wolski, P., Murray-Hudson, M., Thito, K., Cassidy, L., 2017. Keeping it simple: Monitoring flood extent in large data-poor wetlands using MODIS SWIR data. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 57, 224–234. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2017.01.005>
- Youssef, A. M., Pradhan, B., Hassan, A. M., 2011. Flash flood risk estimation along the St. Katherine road, southern Sinai, Egypt using GIS based morphometry and satellite imagery. *Environmental Earth Sciences* 62 (3), 611–623. <https://doi.org/10.1007/s12665-010-0551-1>
- Yuan, J., Wang, X., Yan, C. X., Wang, S. R., Ju, X. P., Li, Y., 2019. Soil moisture retrieval model for remote sensing using reflected hyperspectral information. *Remote Sensing* 11 (3). <https://doi.org/10.3390/rs11030366>
- Zhan, X., Sohlberg, R. A., Townshend, J. R. G., DiMiceli, C., Carroll, M. L., Eastman, J. C., Hansen, M. C., DeFries, R. S., 2002. Detection of land cover changes using MODIS 250 m data. *Remote Sensing of Environment* 83 (1–2), 336–350. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(02\)00081-0](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(02)00081-0)
- Zheng, X., Xiong, H., Gong, J., Yue, L., 2015. A robust channel network extraction method combining discrete curve evolution and the skeleton construction technique. *Advances in Water Resources* 83 (September), 17–27. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2015.05.003>
- Zhu, Z., 2017. Change detection using landsat time series: A review of frequencies, preprocessing, algorithms, and applications. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 130, 370–384. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2017.06.013>
- Schepanski, K., Wright, T. J., Knippertz, P., 2012. Evidence for flash floods over deserts from loss of coherence in InSAR imagery. *Journal of Geophysical Research Atmospheres* 117 (20), 1–10. <https://doi.org/10.1029/2012JD017580>
- Schumann, G. J. P., Moller, D. K., 2015. Microwave remote sensing of flood inundation. *Physics and Chemistry of the Earth* 83–84, 84–95. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2015.05.002>
- Svoray, T., 2004. Integrating automatically processed SPOT HRV Pan imagery in a DEM-based procedure for channel network extraction. *International Journal of Remote Sensing* 25 (17), 3541–3547. <https://doi.org/10.1080/01431160410001684992>
- Theilen-Willige, B., Charif, A., El Ouahidi, A., Chaibi, M., Ougougdal, M. A., AitMalek, H., 2015. Flash floods in the guelmim area/southwest morocco—use of remote sensing and GIS-tools for the detection of flooding-prone areas. *Geosciences (Switzerland)* 5 (2), 203–221. <https://doi.org/10.3390/geosciences5020203>
- Theilen-Willige, B., Wenzel, H., 2019. Remote sensing and GIS contribution to a natural hazard database in western Saudi Arabia. *Geosciences (Switzerland)* 9 (9), 1–27. <https://doi.org/10.3390/geosciences9090380>
- Tueller, P. T., 1987. Remote Sensing science application in arid environments. *Remote Sensing of Environment* 23, 143.
- Walker, D., Smigaj, M., Jovanovic, N., 2019. Ephemeral sand river flow detection using satellite optical remote sensing. *Journal of Arid Environments* 168 (1), 17–25. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2019.05.006>