



# התפתחות בזמן ובמרחב של אזור המפגש בין העתק ים המלח ורצועת ההעתקה כרמל-גלבע-פריעה

יריב חמיאל, עודד כץ, יואב אבני

המכון הגיאולוגי לישראל



בתמונה: העתק בואדי אום חרז, מזרח הבקיעה

אפריל 2022

## תוכן העניינים:

2	..... הקדמה
3	..... רקע גיאולוגי וטקטוני
7	..... אנליזת נתונים גיאודטיים
11	..... תצפיות ומיפוי גיאולוגי
11	..... סטרטיגרפיה מיוקנית-פלייסטוקנית
15	..... תהליכי העתקה
25	..... סיכום, דיון ומסקנות
27	..... תודות
28	..... מקורות

## הקדמה

המקורות העיקריים למעוותים טקטוניים עכשוויים ושחרור אנרגיה סייסמית באזור הלבנט הם גבול הלוחות לאורך העתק ים המלח (DSF) והעתק התוך-לוחי של כרמל-גלבוע-פריעה (CGFS). שתי מערכות-העתקים אילו נפגשות בבקעת הירדן (איור 1). במסגרת המחקר המוצג בסיור, ניתחנו את האופי וההשתרעות במרחב של ההעתקה באזור המפגש של שתי מערכות ההעתקים הנ"ל מזמן יצירתם במיוקן המוקדם, ושחררנו את ההתפתחות בזמן ובמרחב של אזור מפגש המערכות. שחזור זה תורם להבנה טובה יותר של ההתפתחות הטקטונית של לוח-סיני ושל הפוטנציאל הסיסמי באזור המפגש.

העתק ים המלח מהווה את גבול הלוחות בין הלוח הערבי והלוח של סיני, כאשר התנועה השמאלית בין הלוחות מתרחשת לאורכו (איור 1). אורכו של ההעתק כ-1,000 ק"מ מאזור הפתיחה בים סוף בדרום ועד לאזור ההתכנסות של אנטליה-סיני-ערב בצפון (למשל, Garfunkel, 1984). היצירה של העתק ים המלח כגבול לוחות מתוארכת למיוקן המוקדם, 16 - 20 מיליון שנה לפני ההווה (למשל, Eyal et al., 1981; Garfunkel, 1981; Nuriel et al., 2017), ויוחסה להיפרדות הלוחות של אפריקה, סיני וערב ולתנועה היחסית של 100 - 110 ק"מ של לוח סיני ביחס ללוח ערב מאז המיוקן המוקדם (למשל, Quennell, 1958; Freund et al., 1970; McKenzie et al., 1970; Garfunkel, 1981).

העתק כרמל-גלבוע-פריעה הוא העתק פנים-לוחי עיקרי בלוח סיני (איור 1), המהווה גבול בין שני בלוקים-טקטוניים שונים (למשל, Dembo et al., 2015; Gomez et al., 2020; Hamiel and Piatibratova, 2021). אורכו של ההעתק כ-80 ק"מ, הוא מתפצל מהעתק ים המלח במרכז בקעת הירדן, מתמשך לכיוון צפון-מערב עד קצהו הצפוני של הר כרמל וממשיך באותו כיוון מתחת לים התיכון (למשל, Garfunkel and Almagor, 1984; Ben-Gai and Ben-Avraham, 1995; Hofstetter et al., 1996). מקטעי ההעתק העיקריים הם: כרמל, גלבוע ופריעה (תרצה). העתק הכרמל, הצפון-מערבי ביותר במערכת, הוא העתק שמאלי עם רכיב נורמלי (למשל, Ben-Gai and Ben-Avraham, 1995; Achmon and Ben-Avraham, 1997; Sadeh et al., 2012; Dembo et al., 2015). העתק הגלבוע בצפון והעתק פריעה בדרום, המקטעים המזרחיים של המערכת (איור 1), הם העתקים נורמליים הנוטים בכיוון צפון-מזרח (Hatzor and Reches, 1990; Shaliv et al., 1991).

מחקרים גאודזיים מהזמן האחרון (Hamiel et al., 2016; Hamiel et al., 2018; Gomez et al., 2020; Sadeh et al., 2012; Hamiel and Piatibratova, 2021) הראו שקצב ההחלקה העכשווי לאורך העתק ים המלח הוא 5 מ"מ/שנה מדרום לפיצול עם העתק כרמל-גלבוע-פריעה, ושהקצב דועך ל-4 מ"מ/שנה מצפון לפיצול. מחקרים אילו חישבו תנועת החלקה של 0.5 – 1.6 מ"מ/שנה לאורך העתק כרמל-גלבוע-פריעה והציעו שהדעיכה שנצפתה בקצב החלקה לאורך העתקי ים המלח מצפון לאזור המפגש היא תוצאה של העתקה על מערכת העתקי הכרמל-גלבוע-פריעה ושנקודת המפגש בין ההעתקים מתקיים 'צומת משולש' (triple junction).

המפגש בין שתי מערכות ההעתקים משתרע על פני אזור דפורמציה ברוחב 3 ק"מ, בין ההעתקים של פריעה וגלבוע ולאורכה של בקעת הירדן המרכזית (למשל, Shaliv et al., 1991; Segev et al., 2014; Dembo et al., 2015). הגבול הצפוני של אזור הפיצול מוגדר על ידי עמק בית שאן הממוקם בין העתק הגלבוע והעתק ים המלח (איור 1). עד כה, לא ברור האם כלל השטח בין העתק הגלבוע והעתק פריעה פעיל טקטונית, ואם לא, אזי היכן נמצא אזור הפיצול ואיך הוא התפתח עם הזמן מאז המיוקן? בעבודה המוצגת בסיור חקרנו את השינויים בזמן ובמרחב של הדפורמציה הטקטונית באזור המפגש בין העתק ים המלח וכרמל-גלבוע-פריעה, תוך שילוב של שיטות גיאולוגיות וגיאופיזיות, זאת על מנת למקם טוב יותר את אזור המפגש.

## רקע גיאולוגי וטקטוני

אזור המחקר והסיור משתרע מהעתק פריעה (תרצה) בדרום, דרך אנטיקלינת פריעה ועד לחלקה הדרומי של בקעת בית שאן בצפון (איור 1). תצורות הסלע שנחשפו באזור זה הן ממספר חבורות סטרטיגרפיות, החל מחבורת ערד היוראסית ועד חבורת ים המלח הרבעונית. תצורות הסלע העתיקות יותר, מתקופת היורה ועד הקרטיקון התחתון, נחשפות בליבת אנטיקלינה פריעה, בעוד שסלעים של הקרטיקון העליון עד חבורת הר הצופים הפליאוקנית וחבורת עבדת האיאוקנית נחשפים לאורך הצלע המזרחית של האנטיקלינה, ויוצרים את הגבול המערבי של בקעת הירדן (Mimran 1984; Shaliv et al., 1991). האנטיקלינה של פריעה נחצית על ידי מספר העתקים בכיוון צפון-מערב עליהם נמדדו תזוזות אנכיות הנעות בין 500 - 800 מ'. ההעתקים העיקריים הם: העתק פריעה בדרום והגבול הדרומי של בקעת בית שאן בצפון. בין העתק פריעה לעמק בית שאן קיימים העתקים פחות בולטים בכיוון צפון מערב (איור 1), כגון העתקי בוקיעה ותיאסיר, (Shaliv et al., 1991; Mimran et al., 2016).

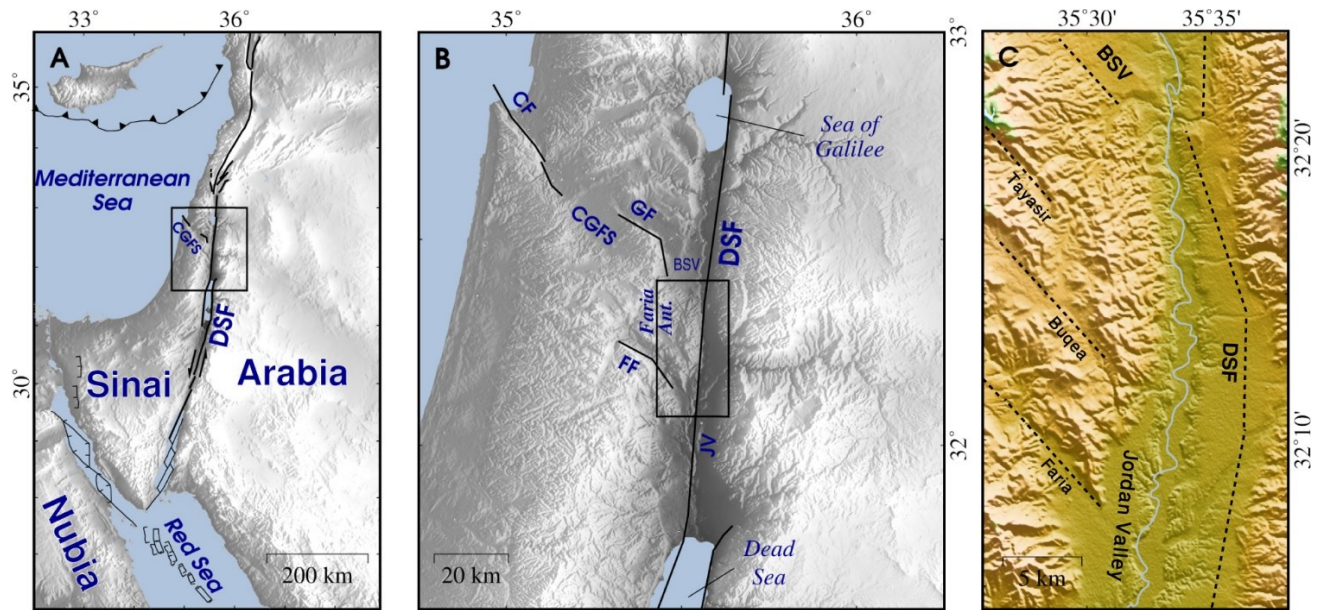
אנטיקלינה פריעה התפתחה במהלך הטורון המאוחר עד האיאוקן המוקדם כחלק ממבני הקשת הסורית (Krenkel, 1924), והופעה מחדש במהלך האוליגוקן והמיוקן הקדום ככל הנראה בעקבות היפרדות הלוחות הטקטוניים ויצירת הים האדום (Mimran, 1984; Shaliv et al., 1991). מאוחר יותר, במהלך המיוקן, אזור זה עבר שבירה בכיוון צפון-דרום לאורך ה-DSF ובכיוון צפון-מערב לאורך ה-CGFS, ונוצר אזור מפגש בין המערכות (Freund et al., 1970; Garfunkel, 1981; Mimran, 1984; Shaliv et al., 1991; Segev et al., 2014; Rozenbaum et al., 2016). הפעילות הבו-זמנית של שתי המערכות עדיין נמשכת ומחלקת את לוח סיני לשתי סביבות טקטוניות, מדרום ומצפון ל-CGFS (Ben-Avraham and Ginzburg, 1990; Hofstetter et al., 1996; Sadeh et al., 2012; Dembo et al., 2015; Gomez et al., 2020; Hamiel and Pitibratova, 2021). ההעתקה במיוקן המוקדם לוותה בפעילות געשית נרחבת שיצרה את שפכי הבזלת התחתונה (למשל, Schulman, 1962). סמוך להעתק הגלבווע, אירוע געשי זה התחיל לפני 17.5 מ"ש בקירוב (Shaliv et al., 1991). ההעתקה הנורמלית הנלוות לשלב זה כנראה התרחשה תחת אותו משטר מתיחה שגרר את ההתפרצויות הגעשיות של תקופת הבזלת התחתונה (למשל, Hazor and Reches, 1990; Shaliv et al., 1991; Dembo et al., 2015). השקיעה של קונגלומרט הורדוס בתקופת המיוקן המוקדם – תיכון, על הצלע המזרחית של אנטיקלינת פריעה מציינת גם היא את התפתחותו של אגן טקטוני עמוק לאורך בקעת הירדן באותה תקופה. רוב החומרים הקלסטיים ששקעו בתוך אגן זה נגזרו מהאגף המזרחי של אנטיקלינה פריעה החושפת סלעים מגיל הקרטיקון המאוחר ועד האיאוקן. מרכיבי קונגלומרטים דומים נגזרו מהאגפים המזרחיים של הגראבנים של תיאסיר ובוקיעה, דבר המלמד על היווצרותם של גראבנים אלה החותכים את ציר אנטיקלינת פריעה במהלך המיוקן המוקדם והתיכון (Bentor, 1961; Schulman and Rosenthal, 1968; Shaliv et al., 1991).

במהלך המיוקן המאוחר, התרחש שלב חדש של העתקה נורמלית בכיוון צפון-מערב, שפגע רק בחלק הצפוני של אנטיקלינת פריעה באזורים הגובלים בעמק בית שאן והעצים את התבליט הטקטוני לאורך ההעתקים הקיימים שהתפתחו במקור במיוקן המוקדם (Shaliv et al., 1991). אחד האגנים הטקטוניים הגדולים שהתפתחו בשלב זה הוא אגן בית שאן, בו הצטברו חתכים עבים של תצורת בירה מהמיוקן המאוחר (7 - 10 מ"ש; Rozenbaum et al., 2019). המכילה סלעי גיר, חוואר וגבס ששקעו בסביבות יבשתיות של מים מליחים-רדודים. לאחר מכן, בסוף המיוקן המאוחר ובפליוקן המוקדם שקעה תצורת גשר הבנויה מקונגלומרט גס בבסיסה המלוכד על ידי קרבונט ומעליו רצף של גירים וחוארים של מים מתוקים (5 - 7 מ"ש; Rozenbaum et al., 2019).

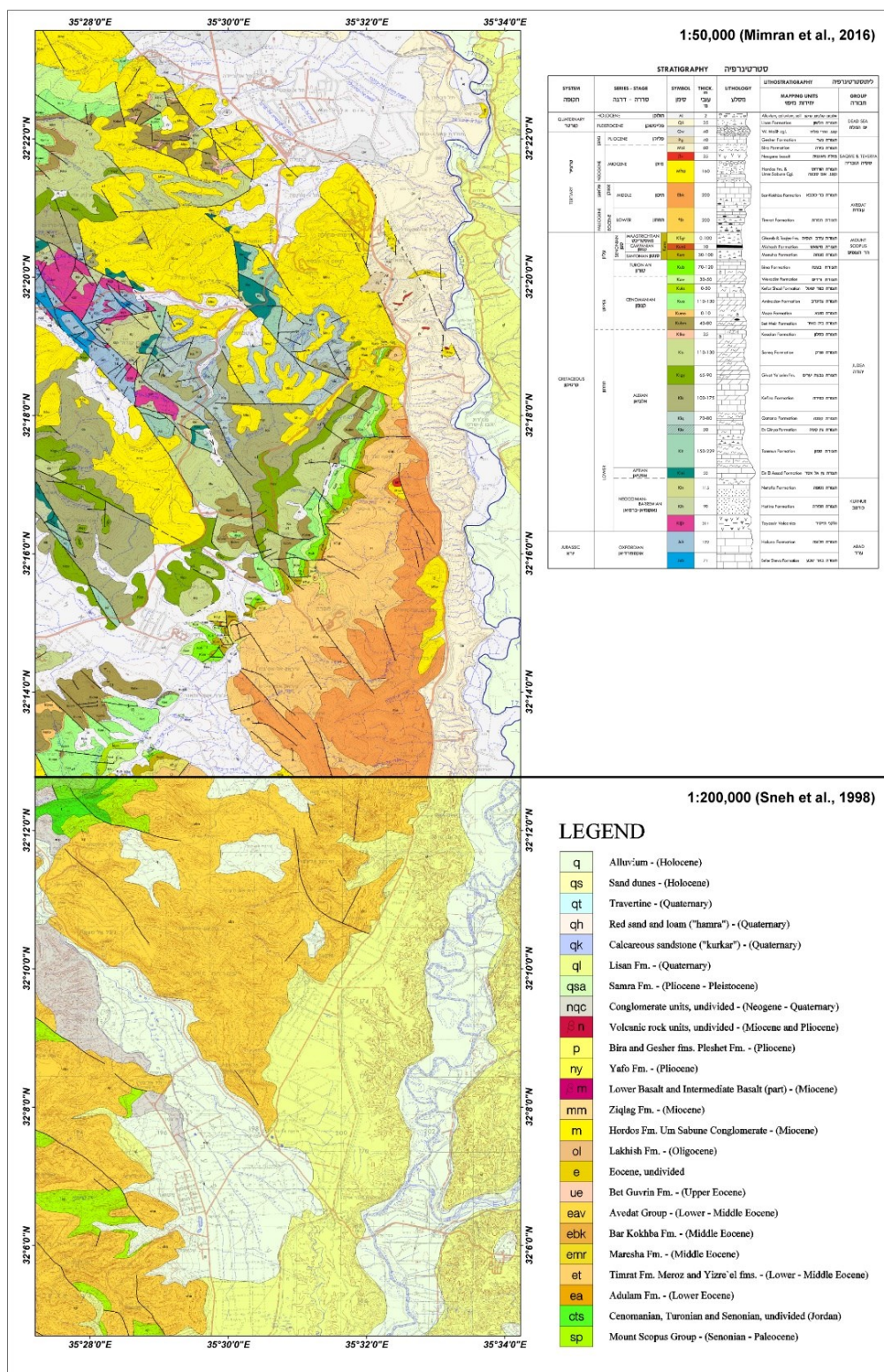
במהלך המיוקן המאוחר והפליוקן המוקדם, התרחש שלב של מתיחה-טקטונית אזורית, בקנה מידה גדול, בצפון ישראל. על כך מעידה הפעילות הגעשית הענפה שיצרה את תצורת בזלת הכיסוי בצפון ישראל (Shaliv et al., 1991).

Heimann et al., 1996). בגזרה הצפון-מזרחית של אזור העבודה, ליד מרמה פייאד (איור 1), נחשפים כמה גופים געשיים משלב זה ומתוארכים ל-5.65 - 5.90 מ"ש (Shaliv et al., 1991; Dembo et al., 2015). בשלב המאוחר לשקיעת בזלת הכיסוי התפתחה העתקה בצפון אנטיקלינת פריעה. שלב טקטוני זה הביא להתחזרות מערכת הניקוז שהזינה במקור את האגמים והביצות של תצורת גשר, ובתוך אגני הניקוז המתעמקים שקעה בפלייסטוקן המוקדם תצורת ואדי מליח הבנוייה מקונגלומרט ואופקי קרקעות אדומות. מערכת זו תועלה לאורך העתקים שכיוונם צפון-דרום שיצרו את עמקו התחתון של ואדי מליח, כשהיא יוצרת מניפה נרחבת במוצא ואדי מליח אל החלק הדרום מזרחי של בקעת בית שאן (Mimran, 1984; Shaliv et al., 1991; Mimran et al., 2016). צפונה יותר, התפתחה מניפה דומה במוצא נחל בזק, המנקז את הצלע הדרומית של הרי הגלבוע לבקעת בית שאן (Hazor, 2000). הרביעון המאוחר מאופיין בפעילות לאורך העתק השוליים המערבי של מערכת ה-DSF, שלוותה בארוזיה עמוקה. מאוחר יותר, לפני כ-70,000 עד 14,000 שנים שקעה באזור תצורת הליסאן (למשל, Begin et al., 1974). הטקטוניקה המאוחרת ביותר שפעלה באזור מודגמת על ידי דפורמציה של משקעי תצורת הליסאן.

בהתבסס על המחקרים הנ"ל, Mimran et al. (2016) פרסמו גרסה מעודכנת של המפה הגיאולוגית 1: 50,000 של החלק הצפוני של אזור העבודה שתואר לעיל (איור 2), בעוד שהחלק הדרומי של האזור בתחומי גיליון מעלה אפרים מתואר רק על ידי מפה גיאולוגית ברזולוציה נמוכה בקני"מ 1: 200,000 (Sneh et al., 1998) (איור 2). בנוסף, עבודות קודמות (למשל, Shaliv et al., 1991; Mimran 1984; Schulman and Rosenthal, 1968), כולל מפות גיאולוגיות קודמות (Sneh et al., 1998; Mimran et al., 2016), פענחו את החתך הניאוגני שנחשף באזור שמדרום לעמק בית שאן בהתאם להגדרות סטרטיגרפיות שמקורם בחתך הניאוגני שנחשף 30 - 50 ק"מ צפונה, בקרבת הכנרת, ומתואר על ידי Picard (1943) ו-Schulman (1962). קורלציה זו, המתבצעת על פני מרחקים ארוכים, מתעלמת מהמגוון הגדול של שינויי פציאס מקומיים שנצפו ברצף הסטרטיגרפי הנחקר מדרום לעמק בית שאן, ולכן אינה מדויקת. בעבודה המוצגת בסיום, אנו מראים שבדיקה סטרטיגרפית מדוקדקת, תוך בחינה מחדש של קורלציה זו, מובילים להבנה טובה יותר של הרצף הסדימנטרי ומאירים באור חדש את ההתפתחות הטקטונית הניאוגנית-רביעונית של אזור המחקר ובפרט את ההיסטוריה הגיאולוגית של פיצול מערכות ההעתקים DSF-CGFS.



**איור 1.** (א) מפה של אזור הלבנט המציגה את הלוחות הטקטוניים ואת מיקומם של העתק ים המלח (DSF) ומערכת ההעתקים של הכרמל-גלבע-פריעה (CGFS). המלבן השחור מציג את המיקום של איור ב. (ב) מפת מיקום של אזור נרחב סביב אזור המפגש של ה-DSF וה-CGFS. במפה מוצגים גם מיקומי המקטעים הראשיים של ה-CGFS: העתק הכרמל (CF), העתק גלבע (GF) והעתק הפריעה (FF). המלבן השחור מציג את המיקום של איור ג. (ג) מפת מיקום של אזור המחקר המציגה את האנטיקלינה פריעה במערב ואת בקעות בית שאן (BSV) בצפון ובקעת הירדן במזרח. הקווים השחורים המקווקוים מציינים את מיקומי ההעתקים הראשיים והגבול הדרומי של בקעת בית שאן וכן את ההעתקים בתוך האנטיקלינה.



**איור 2.** מפות גיאולוגיות קודמות של אזור המחקר. בצפון האזור- מפה גיאולוגית 1: 50,000 גיליון בקעות ( Mimran et al., 2016). בדרום- מפה גיאולוגית ברזולוציה נמוכה 1: 200,000 (Sneh et al., 1998). תשומת לב מופנית לחשיפה הנרחבת של תצורת הורדוס בגיליון בקעות. כמו כן, לחוסר החלוקה בין היחידות הנאוגניות-רביעוניות בדרום (מפה גיאולוגית 1: 200,000).

## אנליזת נתונים גיאודטיים

העבודה המוצגת משלבת עיבוד נתונים גיאודטיים, סייסמים ומיפוי גיאולוגי. בפרק זה נציג את ניתוח הנתונים הגיאודטיים. נתחיל בניתוח נתוני GPS ונסיים בניתוח נתונים טופוגרפיים ברזולוציה גבוהה. כפי שיוצג, ניתוח הנתונים הגיאודטיים יסייע לנו בהמשך בניתוח נתוני השדה.

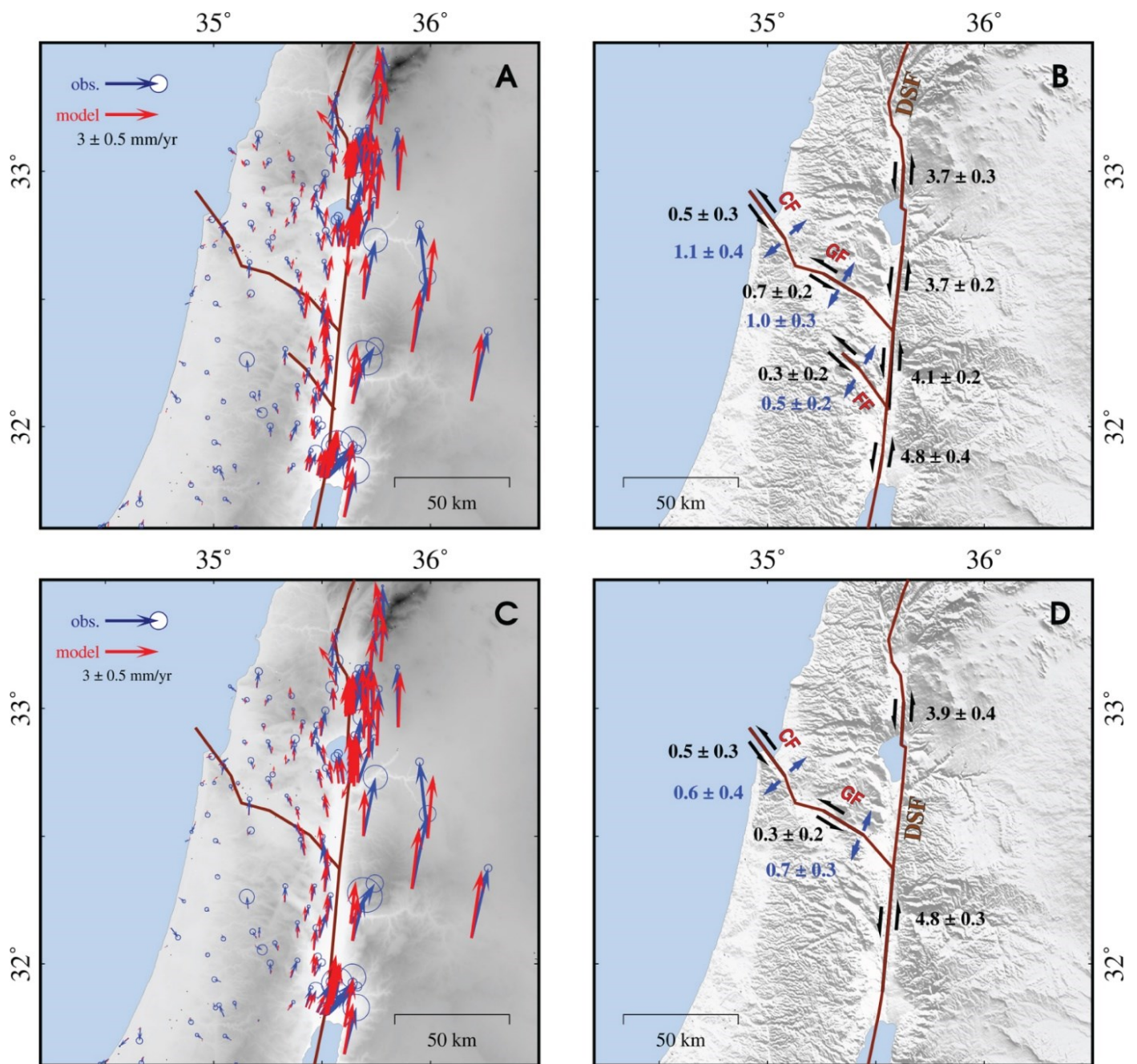
עיבוד וניתוח נתוני GPS באזור מפגש ההעתקים בוצע על ידי Hamiel and Piatibratova (2021) ומוצג כאן באיור 3. איורים 3 A ו- C מציגים את מהירות תחנות ה-GPS ביחס ללוח סיני. הוצבו מודלים מכאניים הכוללים את העתק ים המלח (DSF) ומערכת העתקי הכרמל-גלבוע-פריעה (CGFS) ונבדקו שלושה תרחישים עיקריים: (I) ה-DSF בלבד, כלומר ללא ה-CGFS (לא מוצג כאן); (II) ה-DSF והעתקי הכרמל והגלבוע (איורים 3 C, D); ו-(III) ה-DSF, וה-CGFS כולל העתק הפריעה (איורים 3 A, B). נמצא כי גיאומטריית ההעתקים המורכבת מה-DSF והעתקי הכרמל והגלבוע (תצורה II) היא התצורה המתאימה ביותר, כלומר עם ערך ה-RMS הנמוך ביותר מבין התרחישים השונים (0.43 מ"מ לשנה). התעלמות מהתרומה של ה-CGFS מעלה את ערך ה-RMS ל-0.54 מ"מ/שנה. מצד שני, הוספת העתק הפריעה אינה משפרת ולמעשה אף מעלה מעט את ערך ה-RMS מעט ל-0.45 מ"מ/שנה. תוצאה זו מדגישה את התרומה המשמעותית של העתקי הגלבוע והכרמל לדפורמציה האזורית ומצביעה על כך שהתרומה הנוכחית של העתק הפריעה קטנה עד כדי זניחה. יתרה מכך, על ידי הוספת העתק הפריעה יש במודל יותר פרמטרים חופשיים וערכי RMS דומים, דבר המדגיש עוד יותר כי הוספת העתק הפריעה למודל אינה משפרת את ההתאמה לתצפיות. תוצאות המודל המתאים ביותר וכולל את העתק ים המלח והעתקי הכרמל-גלבוע מצביע על ירידת מהירות התנועה על העתק ים המלח מ-5 מ"מ לשנה, דרומית לאזור המפגש, לערך של כ-4 מ"מ לשנה, צפונית לאזור המפגש. המהירות הכוללת המתקבלת על העתק הכרמל היא שילוב של תנועת גזירה שמאלית והעתקה נורמאלית בקצב של כ-0.8 מ"מ לשנה במקביל לכיוון העתק ים המלח, ובהתאמה לירידת המהירות לאורכו.

בנוסף לניתוח נתוני GPS בוצע ניתוח מפורט של נתוני טופוגרפיה ברזולוציה גבוהה. תחילה השתמשנו במודל גובה דיגיטלי (DEM) בעל גודל פיקסלים של 30 על 30 מ"ר המבוסס על נתוני לוויין (ASTER) כדי לנתח את המורפו-טקטוניקה של אזור המחקר (איורים 4 A, B). נתונים אלו מדגישים את הגובה הנמוך יחסית של בקעת הירדן במזרח, בקעת בית שאן בצפון והחלק המזרחי ביותר של בקעת פריעה בדרום. איור A4 מציג מעבר הדרגתי האזור המוגבה של אנטיקלינת פריעה בדרום לעמק בית שאן הנמוך בצפון. מהאיור עולה כי אפיקו הנוכחי של ואדי מליח זורם לצפון-מזרח, ולאחר מכן, בהגיעו לבקעת בית שאן, הוא פונה בחדות מזרחה לכיוון נהר הירדן. בנוסף, איור A4 מציג את הרכס הקטן של תל אל-קרן (Tel Al Qarn) הנמצא בתוך בקעת הירדן, מזרחית לנהר הירדן. תל אל-קרן הוא מבנה לחיצה הממוקם באזור של קפיצה ימנית בין מקטעי ה-DSF הראשיים (למשל, Ferry et al., 2007). לאורך הגבול הצפוני של תל אל-קרן זורם מערבה נחל קטן (Wadi Al Qarn) אל נהר הירדן ונשפך לנהר הירדן מול ואדי מליח, בדיוק באותו מקום וכיוון כמו ואדי מליח (איור A4). ערוץ מזרחי ומערבי זה (כלומר ואדי אל-קרן וואדי מליח) מייצגים המשך של אותו שקע טופוגרפי ומצביעים על כך שהם ככל הנראה נוצרו לאורך העתק כוון צפון-מערב המתרחק מה-DSF וחוצה את כל בקעת הירדן. איור B4 מציג את עמק פריעה הצר ואת המעבר החד לטופוגרפיה גבוהה יחסית של אנטיקלינה פריעה מצפון לעמק.

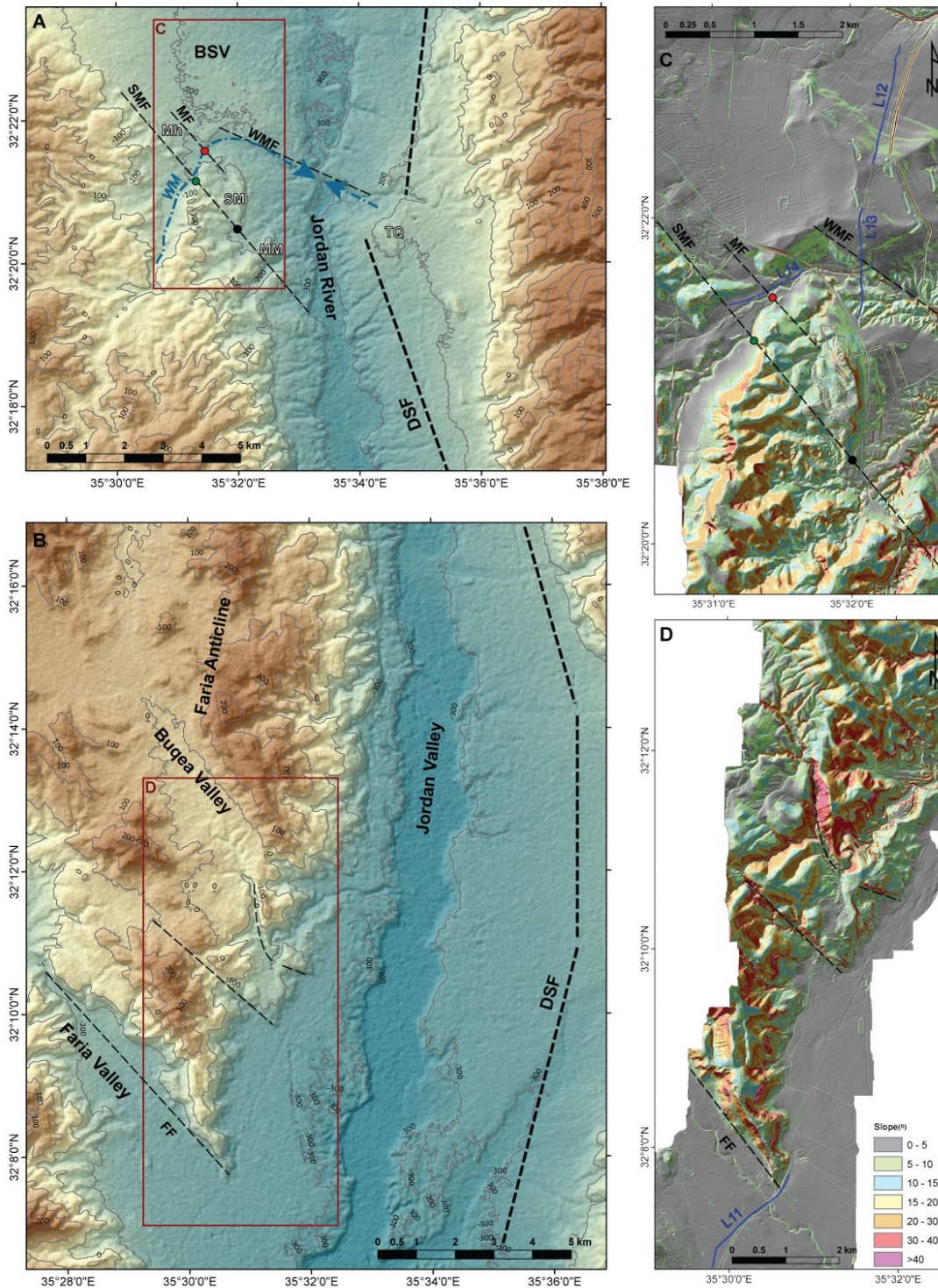


השתמשנו גם בנתוני ליידר (LiDAR) מוטס כדי לזהות מאפיינים מורפולוגיים עדינים ולבדוק את הקשר שלהם עם שבירת פני שטח (איורים 4, C, D). נתוני ה-LiDAR הם ברזולוציה של 4 נקודות למטר. מודל טופוגרפי עם גודל פיקסל של 3 על 3 מ"ר חושב מתוך נתוני ה-LiDAR ובאמצעותו חושבו מפות שיפועים טופוגרפיים. למרות שניתן לחשב רשת ברזולוציה גבוהה יותר מהנתונים המקוריים (עם גודל פיקסל מינימלי של 0.5 על 0.5 מ"ר), נמצא שהרשת בגודל 3 על 3 מ"ר מפחיתה רעשים רקע בתדרים גבוהים שאינם רלוונטיים לניתוח הנוכחי. מפות השיפועים הטופוגרפיים מאפשרות לנו לזהות קווים על פני השטח, המתבטאים בשינויים פתאומיים בשיפוע הטופוגרפיה. איור 4 C מציג את מפת השיפועים המחושבים בסמוך לקצה הצפוני של אנטיקלינת פריעה וחלקה הדרומי של בקעת בית שאן. כפי שמוצג באיור זה, זוהו שלושה לינאמנטים (קווים) עיקריים בכוון צפון-מערב, כל אחד באורך כמה קילומטרים. הלינאמנט הדרומי באיור 4 C, המכונה העתק שדמות מחולה (SMF), חוצה את השטח ההררי של הקצה הצפוני של אנטיקלינת פריעה, ומגדיר את המעבר ממדרונות בעל שיפוע חד יחסית לשיפוע מתון יחסית בדרום מזרח. העתק שדמות מחולה ממשיך לכוון צפון-מערב וחוצה את הבקעה הצרה שיוצר ואדי מליח. באזור המפגש של ההעתק עם ואדי מליח ההעתק מסיט שמאלה את גבול המזרחי של הבקעה בכ- 150 מטר (נקודה ירוקה באיורים 4, A, C). כ-500 מ' צפונה משם, נמצא הקו המרכזי, המכונה העתק מחולה (MF; איור 4 C). הוא אינו מצביע על שינוי טופוגרפי ברור, אך הוא מפריד בין שתי גבעות ליד ואדי מליח לבין הגבול הדרומי של בקעת בית שאן. הקו השלישי, המכונה העתק ואדי מליח (WMF; איור 4 C), עוקב אחר הכיוון הכללי של ואדי מליח בחלקו המזרחי, כאשר זה פונה בחדות מזרחה לכיוון נהר הירדן. העתק זה מגדיר את הגבול הדרומי ביותר של בקעת בית שאן.

בסעיפים הבאים נראה כי קווים אלו ממוקמים לאורך העתקים ראשיים המצויים באזור המחקר שלנו. איור D4 מציג את מפת השיפועים הטופוגרפיים המחושבת עבור החלק הדרום מזרחי של אנטיקלינת פריעה והחלק המזרחי של עמק הפריעה. הוא מדגיש את המעבר משיפועים טופוגרפיים מתונים מאוד (0-5 מעלות) בעמק הפריעה לשיפועים חדים בחלק הדרומי של אנטיקלינת פריעה ולאורך העתק הפריעה. הוא גם מדגיש שני קווים נוספים (מסומנים בקווים שחורים מקווקוים) של שינויי שיפוע שחותכים אנטיקלינת הפריעה בכוון צפון-מערב. עם זאת, קווים אלו מוגבלים לאזור אנטיקלינת הפריעה, והם אינם ממשיכים מזרחה לכיוון בקעת הירדן.



**איור 3.** מפות המציגות את נתוני ה-GPS ותוצאות המודל הקינמטי (במ"מ לשנה) הכוללות את העתק ים המלח (DSF) ומערכת ההעתקים של הכרמל-גלבע-פריעה (איורים A, B). כמו כן מוצגות תוצאות מודל ללא העתק הפריעה (איורים C, D). מפות A, C מראות את מהירות תחנות ה-GPS כפי שנמדדו (חצים כחולים) ואת המהירויות המחושבות מהמודלים השונים (חצים אדומים). מפות B, D מראות את קצבי התנועה לאורך העתקים השונים. מספרים בכחול מציינים קצבי פתיחה (והעתקה נורמלית) ומספרים בשחור מציינים תנועת גזירה שמאלית (במ"מ לשנה). שימו לב לירידה בקצב ההחלקה לאורך ה-DSF, צפונה לאזור המפגש עם מערכת העתקים של הכרמל-גלבע-פריעה. המודל הטוב ביותר (עם ערך ה-RMS הנמוך ביותר) הוא המודל ללא העתק הפריעה, המוצג באיורים C, D. העתק הפריעה. CF- העתק הכרמל. GF- העתק הגלבע.



**איור 4.** (A) מפה טופוגרפית של צפון אנטיקלינה פריעה ושל בקעות בית שאן וירדן. (B) מפה טופוגרפית של דרום אנטיקלינת פריעה ובקעת הירדן. הקווים השחורים המקווקים מציינים את מיקומם לינאמנטים מורפולוגיים מרכזיים, והקו הכחול המקווקו מציינ את ערוץ ואדי מליח הנוכחי. המלבנים האדומים מראים את מיקומם של איורים (C) ו-(D). (C) ו-(D) הן מפות שיפועים ברזולוציה גבוהה על גבי טופוגרפיה מוצלת המבוססת על נתוני LiDAR מוטס. המפות מציגות את הקצה הצפוני של אנטיקלינת פריעה ואת החלק הדרומי ביותר של בקעת בית שאן (C) ואת החלק

הדרומי של אנטיקלינת פריעה (D). הקוים השחורים שנצפו במפות A, B מציינים גם קוים לאורך שינויי שיפוע משמעותיים. קוים אלו נמצאו בהמשך כקווי העתקה עיקריים. הנקודה האדומה מציינת את מיקומו של העתק מחולה בסמוך לאיור F7. הנקודה השחורה מציינת את מיקומו של העתק שדמות מחולה באיור B7. נקודה ירוקה מציינת בחץ שחור באיור 11. חיצים כחולים מציינים את מיקומם וכיווני הזרימה של ואדי מליח וואדי אל קרן הנמצא מזרחית לנהר הירדן. הקווים הסגולים מציינים את מיקומם של הקווים הסיסמיים המוצגים באיורים 9 ו-12. D-SF - העתק ים המלח; FF - העתק פריעה; SMF - העתק שדמות מחולה; MF - העתק מחולה; WMF - העתק ואדי מליח; BSV - עמק בית שאן; WM - ערוץ ואדי מליח; MM - מרמה פיאד; SM - שדמות מחולה; MH - מחולה; TQ - תל אל-קרן.

## תצפיות ומיפוי גיאולוגי

במהלך המחקר ביצענו מיפוי גיאולוגי מפורט של האזור הגובל בעמק בית שאן בצפון ובעמק הפריעה בדרום וזאת כדי להבין את ההתפתחות המורפוטונית של האזור לאחר האיאוקן. מיפוי כזה חיוני לזיהוי תהליכי העתקה בסמוך לאזור המפגש בין ה-DSF וה-CGFS. בדקנו והערכנו מחדש את היחידות הסטרטיגרפיות שתוארו במיפוי גיאולוגי קודם של אזור המחקר (Sneh et al., 1998; Mimran et al., 2016). המפה הגיאולוגית החדשה שלנו מוצגת באיור 5.

## סטרטיגרפיה מיוקנית-פלייסטוקנית

מחשופי המיוקן המוקדם-תיכון של תצורת הורדוס נחשפים בחלקים הדרומיים והמזרחיים של אנטיקלינה פריעה (איור 5). מצאנו ומיפנו מחשופים נרחבים חדשים של תצורה זו לאורך ובין בקעות הפריעה והבקיעה. תצורת הורדוס, שעובייה מגיע לכמה מאות מטרים, כוללת כמויות ניכרות (80%-50) של חלוקי סלע קרבונטי, בעיקר ממקור איאוקני וקרטיקוני, המלוכדים על ידי צמנט קרבונטי קשה בצבע אדמדם עד צהבהב (איור 6). ההשקעה של תצורת הורדוס התרחשה על גבי התבליט המורפו-טקטוני שהתפתח במשטר של מתיחה במיוקן המוקדם, בעיקר בתוך הגרבונים של פריעה, בקיעה ותיאסר ולאורך השוליים המזרחיים של אנטיקלינה הפריעה הגובלת בבקעת הירדן. בחלק ממקומות אלו תצורת הורדוס מגיעה לעובי של 90-180 מ'. רוב החתך של תצורת הורדוס שקע בשלב הסינטקטוני (ראה להלן). היחידות הקלסטיות העדינות ושכבות הגבס שהושקעו בחלק הצפוני של אנטיקלינה פריעה, מדרום לבקעת בית שאן, אשר יוחסו בעבר ליחידה העליונה של תצורת הורדוס מגיל מיוקן מוקדם-תיכון (Shaliv et al., 1991; Mimran et al., 2016), נמצאו במהלך העבודה החדשה כשייכים לתצורת בירה מגיל מיוקן מאוחר (10-7Ma; Rozenbaum et al., 2019). איור 5 מציג את מיקומה של דוגמא SM1, שנדגמה באזור שמופה בעבר כתצורות הורדוס ואום-סבונה הבלתי מחולקות (Mimran et al., 2016). בדוגמא זאת, הממוקמת קרוב מאוד לשכבת גבס עבה, מצאנו שני סוגים של ננו-מאובנים (*Discoaster cf. D. variabilis* ו-*Umbelicosphaera rotula*) המצביעים על כך שגילה של דוגמא זו צעיר מהמיוקן התיכון אך עתיק יותר מהפליוקן. לפיכך, גיל הסלע שנדגם הינו מיוקן מאוחר, גיל התואם את גיל תצורת בירה. דוגמא SM1 תוארכה על ידי יחסי U-Pb באמצעות מכשיר ה-LA-MC-ICPMS ונמצא שגילה כ- $8.87 \pm 1.29$  מיליוני שנה לפני ההווה. גיל זה תואם את זמן השקעת תוצרת בירה ואינו מתאים לגיל השקעת תצורות הורדוס כפי שהוצע בעבר (Mimran et al., 2016).

תצורת בירה הושקעה בעיקר לאורך חלקה הצפוני של אנטיקלינה פריעה, הגובלת באגן בית שאן. היא מורכבת ממשקעים ימיים ויבשתיים רדודים של אבן גיר, חוואר וגבס (איור 6). היא הושקעה לאחר אירוע שבירה והעתקה שהתרחש ככל הנראה בתקופת המיוקן התיכון, ויצר את הגבול הראשוני והחלוקה הטקטונית בין אנטיקלינה פריעה לעמק בית שאן ואיפשר את ההשקעה של תצורת בירה בתוך הבלוק הירוד (איור 5). עובייה של תצורת בירה גדל בהדרגה

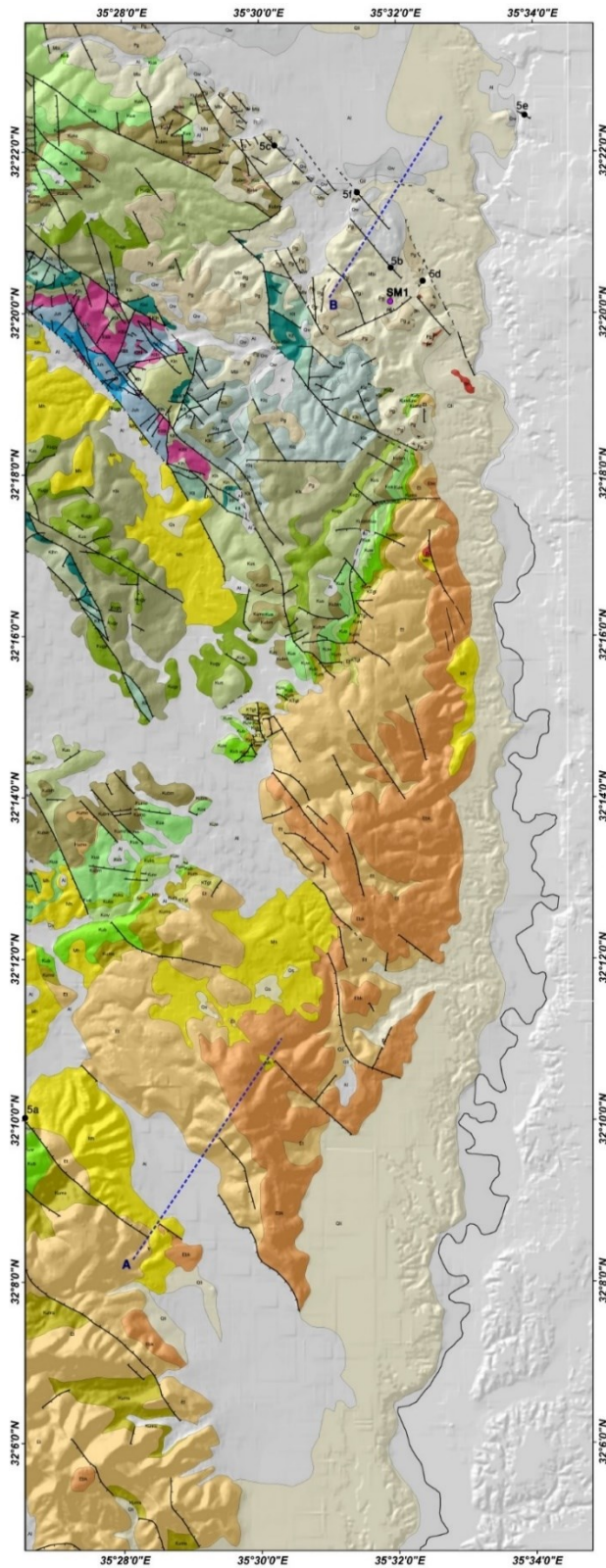
מ-40 ל-100 מ' ככל שמתקרבים לכיוון אגן בית שאן. יש לציין כי מדרום להעתק זה לא זוהתה תצורת בירה, גם לא בתחומי הגרביים של תיאסיר, הבקיעה ופריעה.

תצורת גשר (Rozenbaum et al., 2019; ~5-7 Ma) הושקעה על גבי תצורת בירה רק בחלקה הצפוני של אנטיקלינת פריעה באי-התאמה (איור 5). התצורה כוללת קונגלומרט גס ועבה (30-10 מ') בבסיסו, המורכב מחלוקים ובולדרים שמקורם בחלק העמוק של החתך הסטרטיגרפי שנחשף באנטיקלינת פריעה ומלוכד על ידי צמנט קרבונטי קשה מאוד. קונגלומרט בסיס זה מכוסה על ידי רצף של יחידות גיר וחואר המגיעות לעובי של 30-70 מ' (איור 6). רצף זה יוצר מצוקים החשופים לאורך ראשי הגבעות בצפון אנטיקלינת פריעה.

לאחר השקעת תצורת גשר, התפתחה באזור תקופה ארוזיבית בה התפתחו מערכות הניקוז שהתחתרו עמוקות אל מתחת למפלס הנוף של תצורת בירה. לקראת סוף תקופת הארוזיה, ככל הנראה בפלייסטוקן המוקדם, שקע הקונגלומרט של תצורת ואדי מליח לאורך אזורים נמוכים טופוגרפית של ואדי מליח הקדום אשר ניקז את הגזרה הצפונית של אנטיקלינה פריעה לכיוון דרום בקעת בית שאן (איור 5). הגיל המדויק של תצורה זו אינו ברור, אך רוב המחקרים הקודמים (Shaliv et al., 1991; Mimran et al., 2016) ייחסו לה גיל פלייסטוקן מוקדם (כ-2-1 מיליון שנה). באזור המחקר שלנו, שני מרכיבים ליתולוגיים מבדילים את תצורת ואדי מליח מיחידות קונגלומרטיות עתיקות יותר: היא מכילה כמויות משמעותיות (5-10%) של חלוקי בזלת ואבני חול צבעוניות (איור 6), שניגזרו מסלעים וולקניים ומשכבות אבן חול מתקופת הקרטיקון התחתון שנחשפו בחלק העמוק של אנטיקלינת פריעה. התפוצה המרחבית של מחשופי תצורת ואדי מליח מגדירה מניפה גדולה שהושקעה במוצא מערכת ניקוז קדומה המנקזת את חלקה הצפוני של אנטיקלינת הפריעה אל חלקה הדרומי של בקעת בית שאן (איור 5). לאורך מניפת ואדי מליח הקדום, בטרם התחתר זה לעומקו הנוכחי, יש חילופים בין חומר קלסטי גס – בעיקר קונגלומרט – שהושקע בקודקוד המניפה, לבין מקטעי חומר גרגרי עדין המכילים חלוקי נחל, אבן חול ושכבות חרסית אדמדמה. שכבות אלו משולבות בפלאוסול אדמדם המושקע בגזרה המרוחק של המניפה והן נראות בבירור באזור שדמות מחולה ובמבתר כביש 90 בין הישובים שדמות מחולה ומחולה.

תצורת ליסאן מגיל פלייסטוקן מאוחר מושקעת באי-התאמה על גבי תצורת ואדי מליח ויחידות עתיקות יותר, בעיקר לאורך בקעת הירדן. תצורה זו כוללת שכבות המכילות חומרים מיחידות סטרטיגרפיות עתיקות יותר, בעיקר מתצורת ואדי מליח, והיא כוללת נוסף לשכבות של קונגלומרט פולימיקטי גם שכבות של משקעים אגמיים (איור 4).

תצפית חשובה העולה מן המחקר שלנו היא שבשטח מתקיים הבדל המהותי בחתך הסטרטיגרפי המאוחר לאיאוקן בין חלקו הצפוני וחלקו הדרומי של אנטיקלינת פריעה. בצפון הצטבר חתך מיוקני עד רבעוני מפותח המאפשר חלוקה ברורה של היחידות הסטרטיגרפיות לתצורות הורדוס (ששקעה על המורדות המזרחיים של אנטיקלינת הפריעה), בירה, גשר וואדי מליח (איור 5). לעומת זאת, החתך שהצטבר בגראביים הדרומיים, כמו הפריעה, בקיעה ותייאסיר, מוגבל לתצורת הורדוס בלבד ששקעה באזור בתקופת המיוקן המוקדם עד התיכון. בתקופת המיוקן המאוחר, הפליוקן והרבעון תצורת הורדוס החשופה בחלקה הדרומי של אנטיקלינת פריעה עברה בלייה ונוצרו על גביה ובתוכה חתכים עבים של שכבות אדומות המורכבות מחרסית ופלאוסול אדמדם. במקומות מסוימים באזור זה התפתחו על גבי תצורת ההורדוס או על גבי הקרקעות הבלויות שמעל לתצורה קרומי קלקריט קרבונטיים עבים המכונים "נארי", אשר התפתחו גם על יחידות סלע אחרות ובכלל זה על גבי היחידות הרכות של חבורת יהודה, הר הצופים ועבדת. הקרקעות האדומות וסלעי ה"נארי" נוצרו בתהליכים פדוגניים שהתרחשו באופן נרחב בדרום אזור אנטיקלינת הפריעה והם מקבילים בזמן להשקעה הימית מגיל מיוקן מאוחר – פליוקן שהתרחשה בחלק הצפוני של אנטיקלינת פריעה הגובלת בבקעת בית שאן.

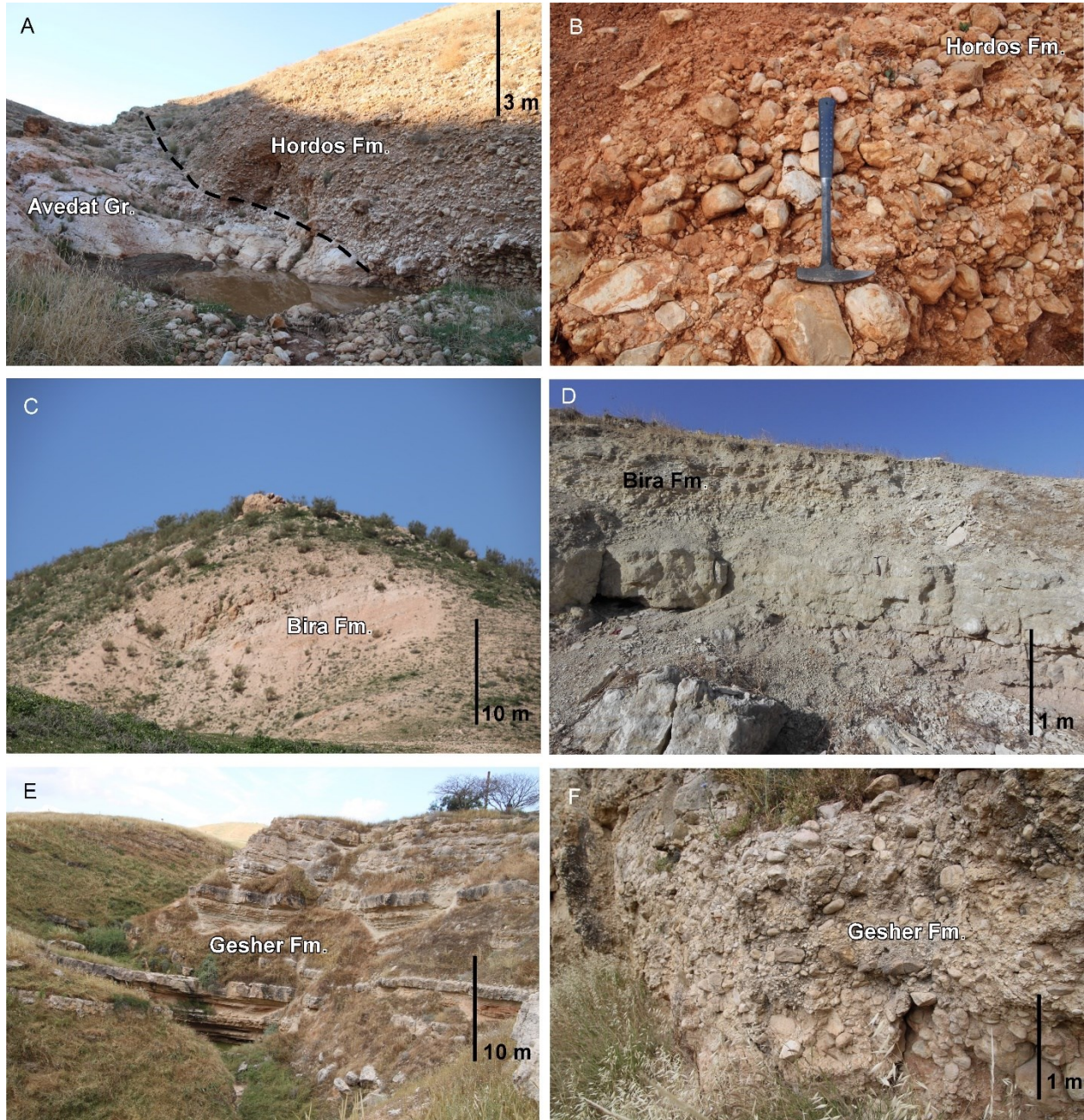


STRATIGRAPHY					
SYSTEM	ERAS - STAGE	SYMBOL	THICK. (M)	LITHOLOGY	
QUATERNARY	HOLOCENE	Q1	0-2	Clay, silt, sand	
	FULLHOLOCENE	Q2	2-20	Clay, silt, sand	
	PLEISTOCENE	Q3	40	W. Alluv. (gl.)	
TERTIARY	MIOCENE	M3	40-100	Gashar Formation	
		M2	45-100	Bira Formation	
		M1	25	Negevian loess	
	Eocene	E4	90-80	Hadar Formation	
		E3	300	Bar-Kalbas Formation	
		E2	200	Tisrev Formation	
		E1	200	Chimbi & Tsiyye fms.	
	UPPER CRETACEOUS	Maastrichtian	K1p	0-100	Mishash Formation
			K1m	10	Mishash Formation
			K1o	30-100	Mishash Formation
Turonian		K2	70-130	Bira Formation	
		K3	30-30	Wadai Formation	
		K4	0-80	Kafar Shal Formation	
Cenomanian		K5	110-130	Amudon Formation	
		K6	0-10	Mesa Formation	
		K7	45-80	Bet Mela Formation	
		K8	20	Kaslon Formation	
LOWER CRETACEOUS	Albian	K9	110-130	Soreq Formation	
		K10	60-80	Chert 'u'la'ba fms.	
		K11	100-170	Kefira Formation	
		K12	75-80	Qatana Formation	
	Aptian	K13	80	En Ghrya Formation	
		K14	180-230	Tamur Formation	
	Neocomian-Saragani	K15	30	En Et Assal Formation	
		K16	110	Nerufa Formation	
		K17	80	Motza Formation	
		K18	300	Tayssar Volcanics	
Jurassic	Oxfordian	J1	130	Holava Formation	
		J2	70	Be'er Sheva Formation	

GEOLOGICAL LEGEND	
Contour between mapping units	Contour of slumped rock-unit
Contour between mapping units, inferred	Slope debris
Fault	Slip (inverted)
Cancelled fault	Rim
Single side cancelled fault	

איור 5. מפה גיאולוגית חדשה של אזור המחקר. שימו לב שבעוד שתצורת ההורדוס מגיל מיוקן מוקדם עד תיכון נחשפת בחלקים הדרומיים והמרכזיים של אזור המחקר, במיוחד לאורך הגרבינים הראשיים, תצורות בירה, גשר וואדי מאלח ששקעו החל מהמיוקן המאוחר ועד הפלייסטוקן המוקדם נחשפות רק בחלקו הצפוני של אזור המחקר. היחידות

הגיאולוגיות ממזרח לנהר הירדן (החלק המזרחי ביותר של המפה) לא מופו. קווים כחולים מקווקווים מציינים את מיקומם של הפרופילים A ו-B המוצגים באיור 8. הנקודה הסגולה מציינת את מיקומו של דוגמא SM1 (איור 6), המתוארכת לגיל מיוקן מאוחר בזמן השקעת תצורת בירה. נקודות שחורות מציינות את מיקום התמונות המוצגות באיור 7.



**איור 6.** תמונות של תצורת הורדוס מגיל מיוקן מוקדם עד תיכון (A,B), תצורת בירה מגיל מיוקן מאוחר (C,D), תצורת גשר מגיל מיוקן מאוחר עד פליוקן מוקדם (E,F), תצורת ואדי מאליה מגיל פלייסטוקן מוקדם (G,H) ותצורת הליסאן מגיל פלייסטוקן מאוחר (I,J). חבורת עבדת (ב-A) היא מגיל איאוקן. שימו לב לחלוק אבן החול החום-אדמדם מגיל קרטיקון מוקדם בתוך קונגלומרט ואדי מליח (איור H). איור D מציג את המסלע באזור בו נלקחה דוגמא SM1 המתוארכת לזמן בו שקעה תצורת בירה.



איור 6. המשך.

### תהליכי העתקה

העתקים בדרום ומרכז אנטיקלינת הפריעה מעתיקים יחידות סלע פרה-מיוקניות ואת החלקים התחתונים של תצורת הורדוס מגיל מיוקן מוקדם-תיכון. במקרים רבים באזורים אלו ההעתקים מכוסים על ידי החלקים העליונים של תצורת הורדוס (איורים 5, 7) בעוד שבמקרים אחרים הם משמשים כמגע בין תצורת הורדוס לסלעים הפרה-מיוקנים. יחסי שדה אלה מרמזים על כך שתצורת הורדוס הסינטקטונית מילאה את התבליט המורפוטקטוני של המיוקן המוקדם-תיכון (ראה גם איור 8 עבור חתך רוחב חוצה גרובן הפריעה בדרום).

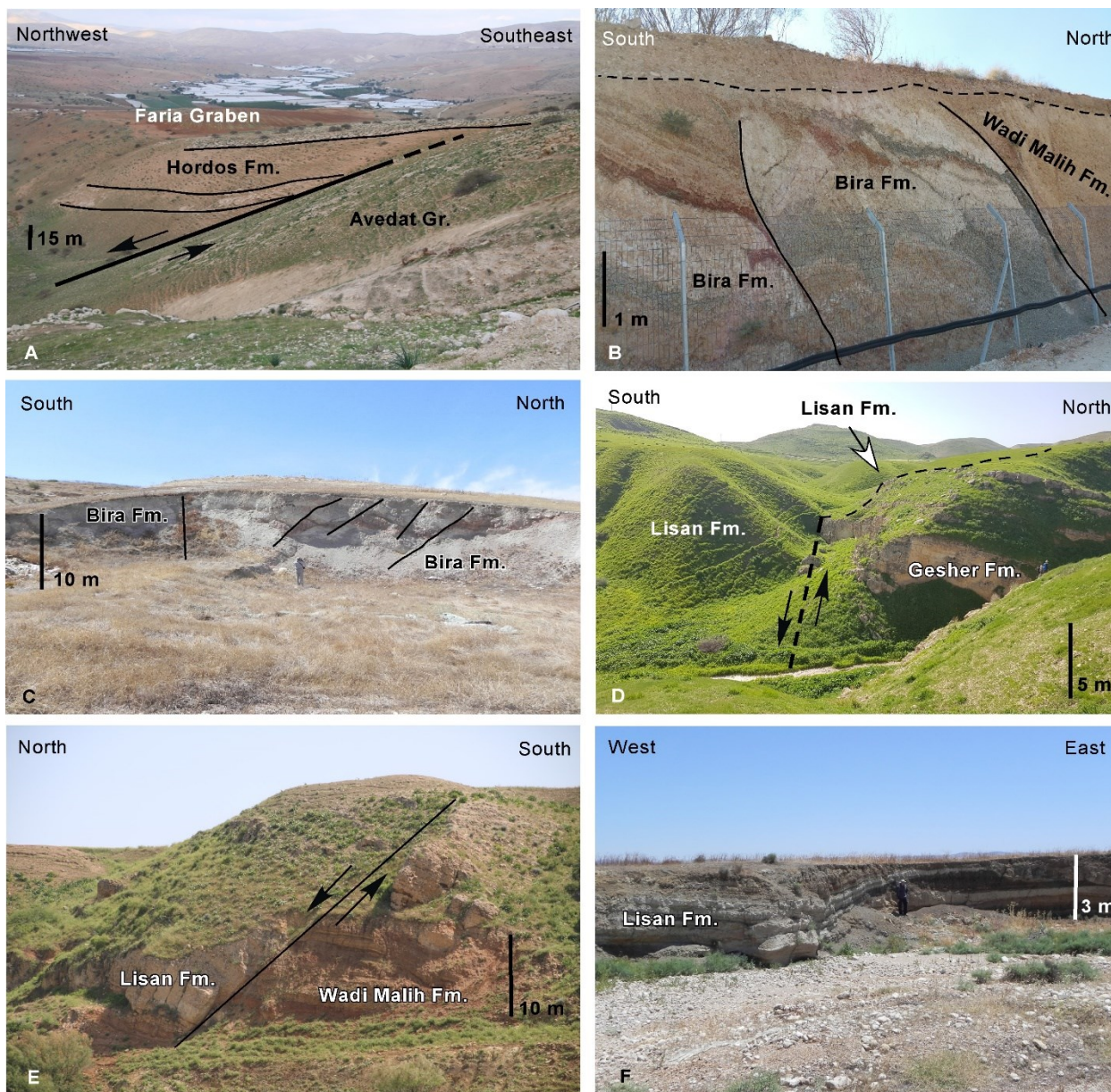
קו סיסמי L11 (איור 9) חוצה את גרובן הפריעה בסמוך לקצהו המזרחי, שם הגרובן מתמזג עם בקעת הירדן (ראה מיקום באיור 4). הוא מציג שני העתקים "עיוורים" (אשר אינם מגיעים לפני השטח) בגבולות הדרום-מערבי והצפון-מזרחי של הבקעה. העתקים אלו מכוסים על ידי תצורת הליסאן מגיל פלייסטוקן מאוחר וכנראה גם על ידי יחידות קדומות יותר. יתרה מזאת, לא מצאנו כל עדות להעתק השובר יחידות רבעוניות בחלקים הדרומיים והמרכזיים של אנטיקלינת הפריעה. תצפית זו באה לידי ביטוי ברור גם ביחסי השדה בין שכבת הקלקריט העבה שהתפתחה על גבי תצורת הורדוס בתקופת המיוקן המאוחר ועד הרביעון המוקדם ושלא הושפעה מהעתקה מאוחרת, כפי שמוצג באיור 7. לכן, אנו מסיקים כי הפעילות הטקטונית בדרום אזור ההעתקה פחתה ואולי אף נעצרה מאז המיוקן התיכון. בניגוד לתצפיות



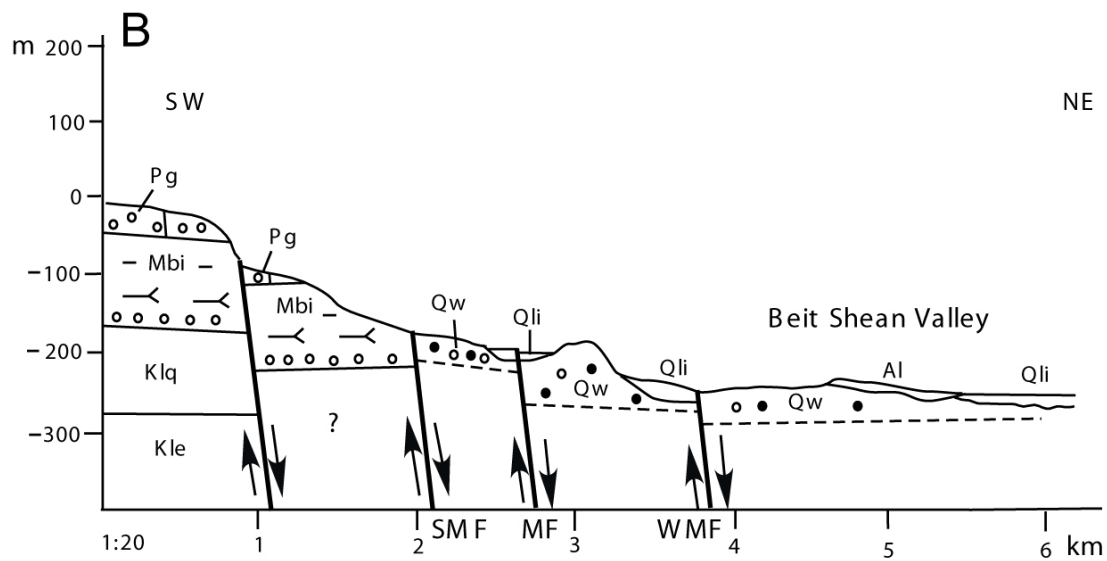
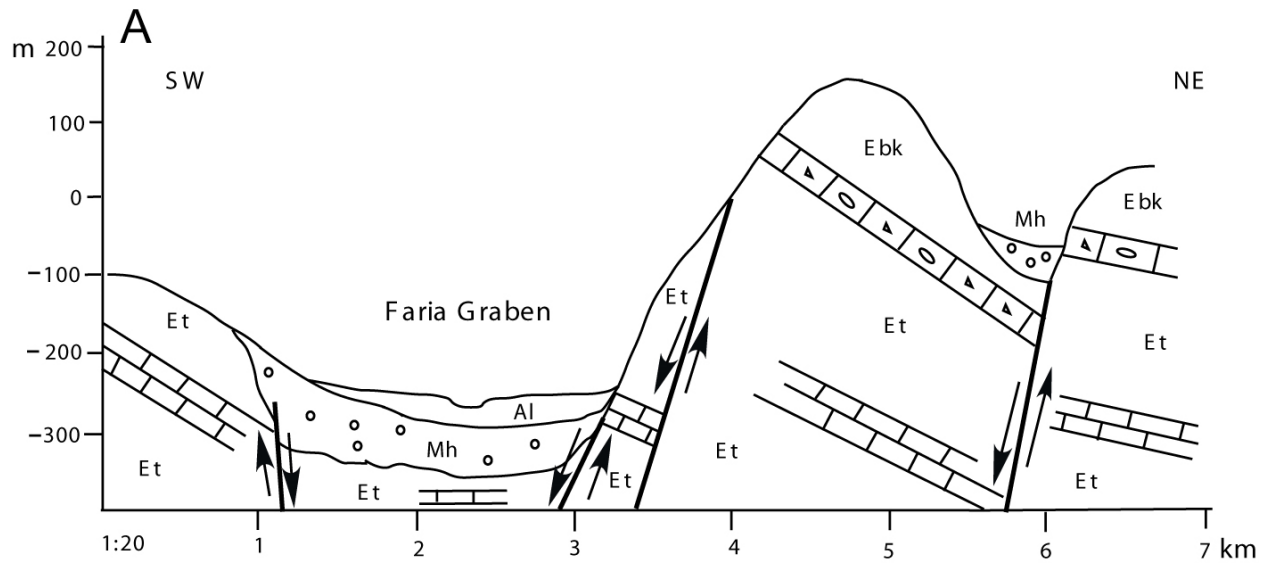
אלו, החלק הצפוני של אזור הסיור הגובל בעמק בית שאן מצביע על תהליכי העתקה משמעותיים מאז המיוקן המאוחר (איור 5).

אבולוציית ההעתקה בחלק הצפוני של אזור העבודה מוצגת באיור 10. קווים שחורים מייצגים העתקים שפעלו לפני המיוקן המאוחר והעתיקו יחידות הקדומות לתצורת בירה. קווים ירוקים, צהובים, כתומים ואדומים מייצגים העתקים שהעתיקו את סלעי תצורת בירה, גשר, ואדי מליח וליסאן, בהתאמה. כל העתק מדרום לאזור המוצג באיור 10 מעתיק רק יחידות סלע הקדומות למיוקן המאוחר, כגון תצורת הורדוס ויחידות סלע עתיקות יותר מגיל איאוקן עד קרטיקון. ככלל, ראינו "נדידה" של פעילות הטקטונית לכיוון צפון, כאשר העתקים שפעלו טרום השקעת תצורת בירה דומיננטיים בחלקים הדרומיים והדרום-מערביים וההעתקים שפעלו לאחר השקעת תצורת הליסאן דומיננטיים באזורים הצפוניים והצפון-מזרחיים של אזור המחקר שלנו. נדידה זו מצביעה על התפתחות בזמן ובמרחב מאז המיוקן המאוחר של המעוות הטקטוני באופן היוצר ומדגיש את הגבול הדרומי של בקעת בית שאן. תצפיות אלו מצביעות על נדידה צפונה של פעילות טקטונית, לכיוון בקעת בית שאן, מאז המיוקן התיכון. רוב ההעתקים שפעלו לפני השקעת תצורת בירה (קווים שחורים באיור 10) ונצפים בחלק הדרומי של אזור המחקר הם העתקים נורמליים. רוב ההעתקים האלו הם בכיוון צפון מערב וככל הנראה החלו לפעול במהלך המיוקן המוקדם, מה שאפשר את שקיעת תצורת הורדוס בתוך הגרביים שהתפתחו באזור כמו הגרביים של הפריעה, בקיעה ותיאסיר (איור 5). שלב שני של העתקה, שהתפתח כנראה במהלך המיוקן התיכון-מאוחר, יצר את הגבול הראשוני בין אנטיקלינת הפריעה לאגן המשתפל של בקעת בית שאן. שלב זה איפשר את ההשקעה של סלעי תצורת בירה בבלוקים השבורים של צפון אנטיקלינת הפריעה, מדרום לגבול הנוכחי של בקעת בית שאן. שלב שלישי של העתקה, המתבטא בעיקר בהעתקה נורמלית, העתיק את תצורת בירה וגשר (קווים ירוקים וצהובים באיור 10, בהתאמה). העתקים אלו ממוקמים מצפון-מזרח להעתקים שהעתיקו יחידות טרום-בירה. הם גרמו להעמקה נוספת של אגן בית שאן והגרבו הצר בכיוון צפון-דרום שבו זורם ואדי מליח הנוכחי לפני כניסתו לבקעת בית שאן (איור 5). ההעתקים שהעתיקו את תצורת בירה וגשר מצביעים על נדידת הגבול בין אנטיקלינת פריעה לבקעת בית שאן לכיוון צפון-מזרח. העתקים רבעוניים שפעלו לאחר השקעת תצורת ואדי מליח (קווים כתומים באיור 10) ממוקמים בקצה הצפוני של אנטיקלינה פריעה (איורים 5, 10, 11), ומסמנים את הגבול הנוכחי בין אנטיקלינה פריעה ובקעת בית שאן. כל ההעתקים של קבוצה זו הם בכיוון צפון מערב (איורים 11, 10). העתקים שפעלו בהולוקן לאחר השקעת תצורת ליסאן (קווים אדומים באיור 10) נצפים בחלק הדרומי ביותר של בקעת בית שאן ובשוליים המערביים של בקעת הירדן (איור 5). כל העתקים אלו הם בכיוון צפון-מערב, בעלי רכיב נורמלי ויוצרים בלוקים ירודים של תצורת הליסאן מגיל פלייסטוקן מאוחר. העתקים אלו נצפו גם בתת-הקרקע בקוים סייסמים חדשים (איור 12).

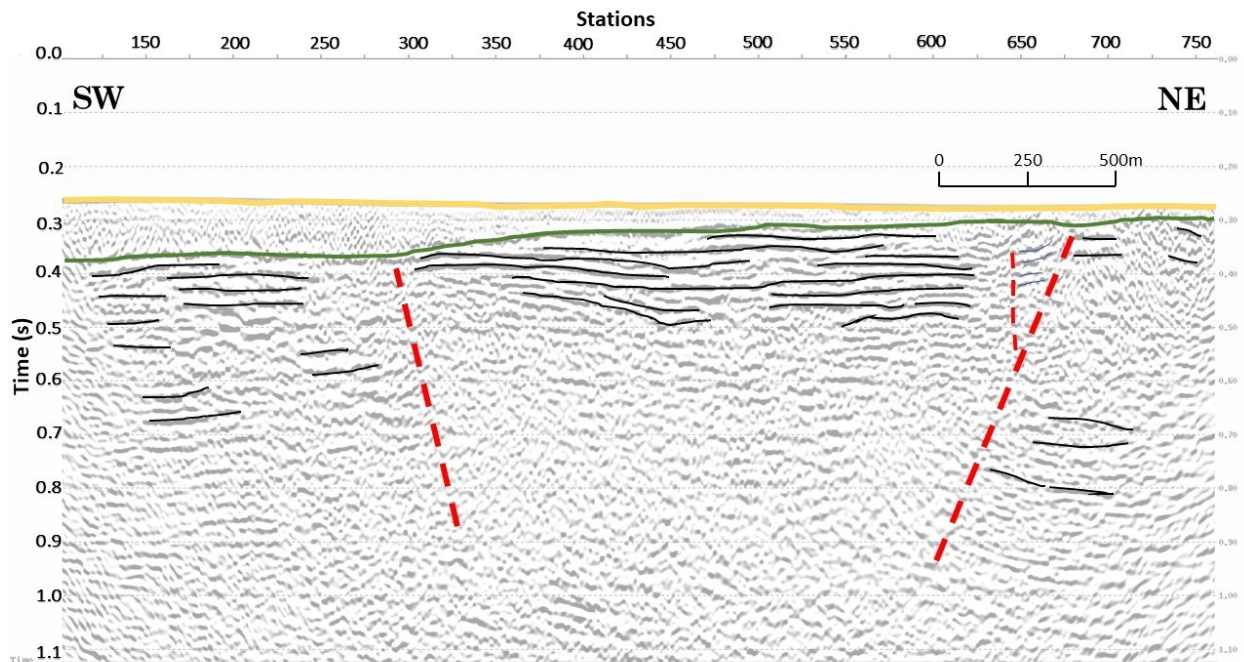
איור B8 מציג חתך מהקצה הצפוני של אנטיקלינת הפריעה לקצה הדרומי של בקעת בית שאן. הוא מראה את העתק שדמות מחולה (SMF), העתק מחולה (MF), העתק ואדי מליח (WMF) ואת תצורת גשר ובירה המועתקות בחלקו הדרומי של החתך ואת תצורת ואדי מליח וליסאן המועתקות בחלקו הצפוני. של החתך. איור 11 מציג שינויים בכיוון הזרימה של ואדי מליח באזור בהם הוא פוגש את העתק SMF השובר את תצורת ואדי מליח ואת העתקי MF ו-WMF השוברים את תצורת הליסאן.



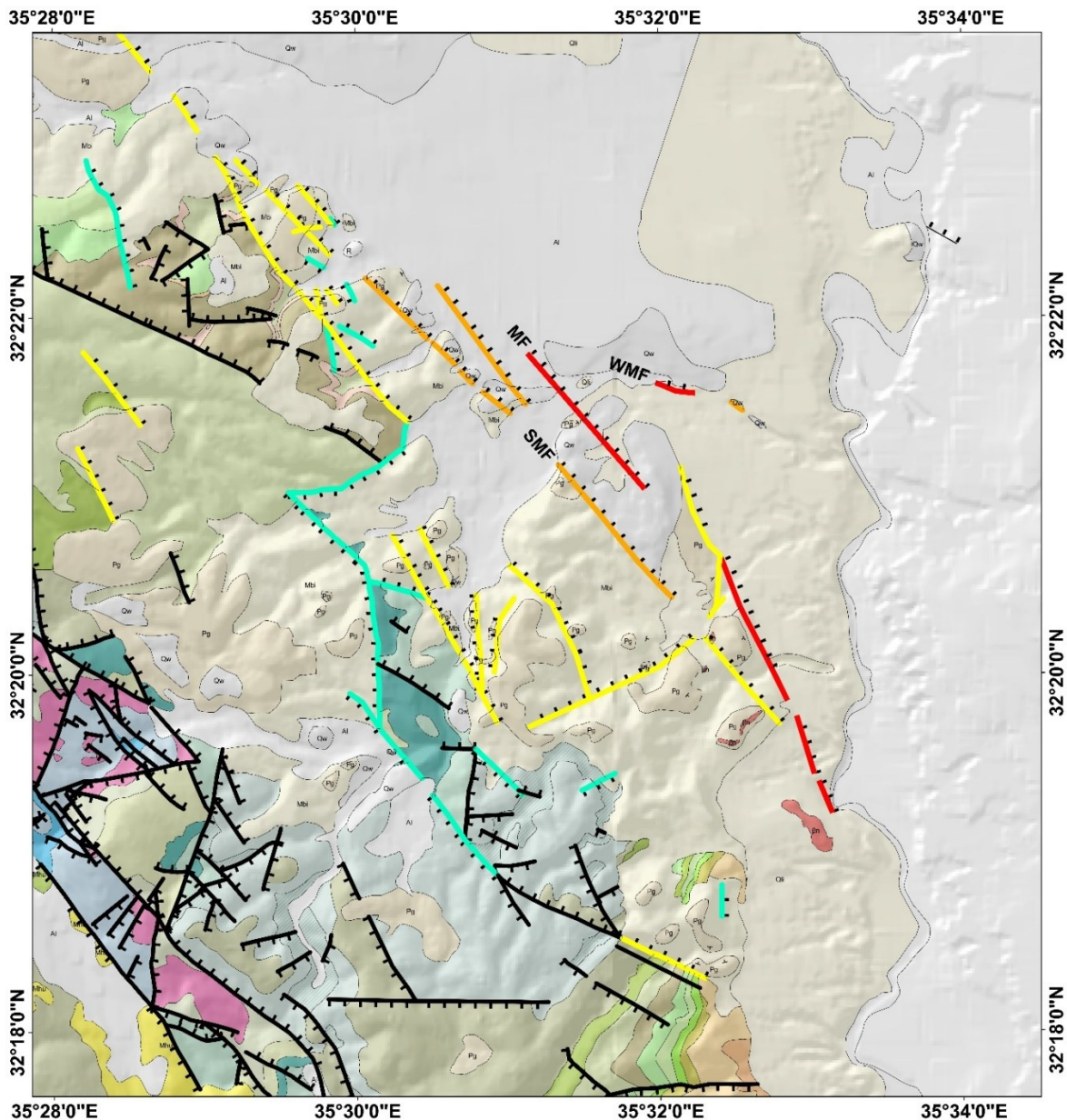
**איור 7.** תמונות של העתקים המעתיקים יחידות נאוגניות וריבעוניות. מיקומי תמונות הללו מוצגים באיור 5. (A) תמונה המציגה את היחסים בין תצורת ההורדוס מגיל מיוקן מוקדם-תיכון לבין העתק השוליים הדרומיות של גרבן הפריעה. שימו לב שבעוד שחבורת עבדת והחלקים התחתונים של תצורת הורדוס מועתקים, החלק העליון של תצורת ההורדוס נמצא ביחסי on-lap עם ההעתק. בתמונה זו שכבת הקלקריט מגיל מיוקן מאוחר עד הרביעון המוקדם והחשופה על פני השטח אינו מועתקת על ידי ההעתק. תצפיות אלו ואחרות מצביעות על כך שגרבן הפריעה לא היה פעיל מבחינה סקטונית מאז המיוקן התיכון. (B) תמונה המציגה חלק מאזור העתק שדמות מחולה (SMF) ואת תצורת בירה וואדי מאלח המועתקות על ידו ושכבה אלביולית צעירה מכסה את ההעתק בקרבת פני השטח. (C) תצורת בירה מועתקת על ידי העתק SMF. (D) תצורת גשר מועתקת. מאוחר יותר האזור כוסה על ידי תצורת הליסאן. (E) תצורת וואדי מליח וליסאן מועתקות ממזרח לנהר הירדן. (F) משקעי ליסאן מעוותים בצמוד להעתק מחולה (MF). שם הערוץ הפעיל של וואדי מליח משנה את כיוון הזרימה שלו מצפון למערב.



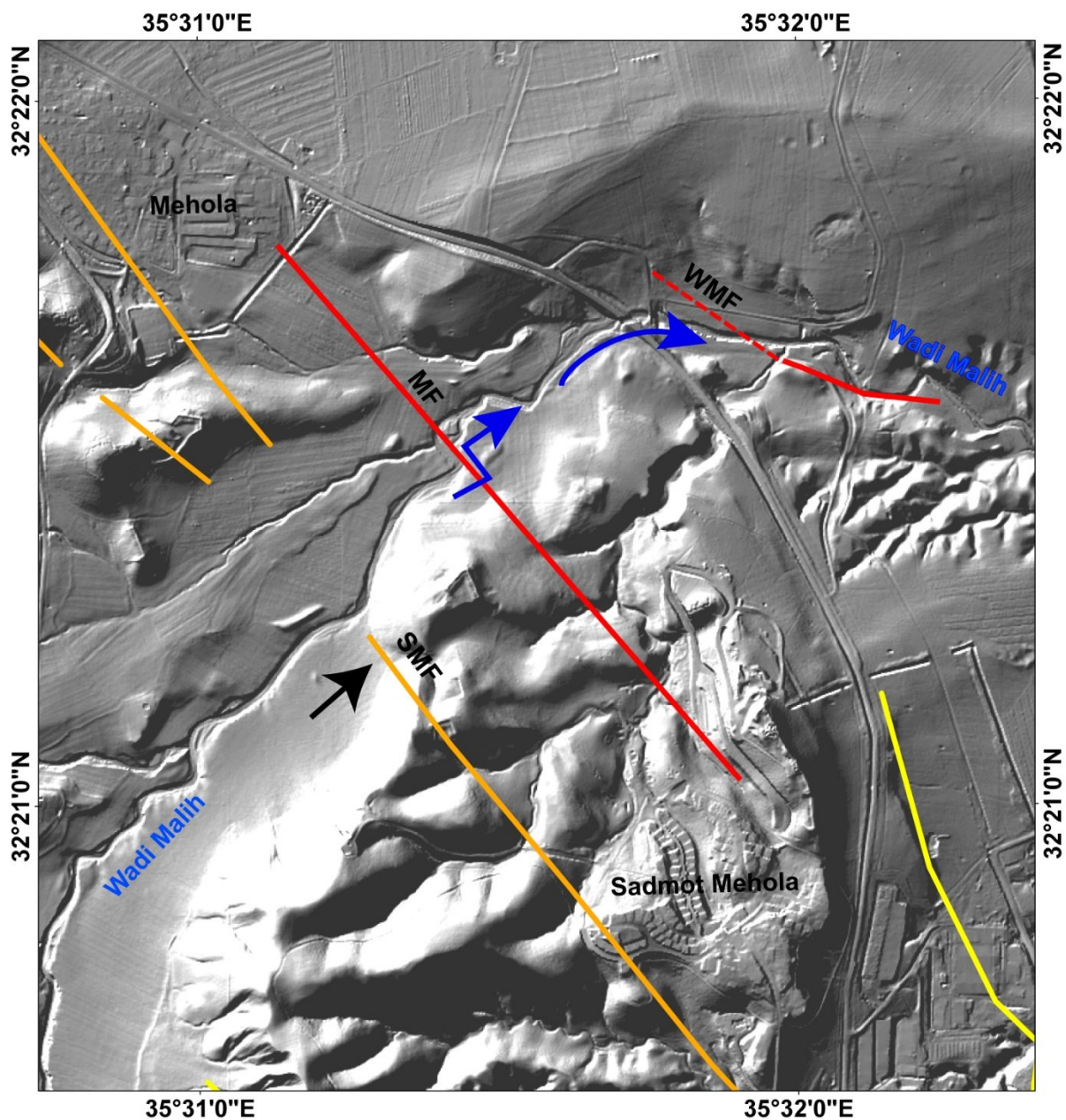
**איור 8.** (A) חתך לרוחב גרובן הפריעה בדרום. שימו לב שבעוד שהחלק התחתון של תצורת ההורדוס מועתק, החלק העליון נמצא ביחסי on-lap ההעתק או שהוא מכסה סלע קדום מועתק. (B) חתך מהקצה הצפוני של אנטיקלינה פריעה ועד לחלקו הדרומי של בקעת בית שאן. שימו לב למיקום של העתקי SMF, MF ו-WMF ושרק ההעתקים הצפון-מזרחיים ביותר (ה-MF וה-WMF) מעתיקים את תצורת הליסאן. SMF- העתק שדמות מחולה. MF- העתק מחולה. WMF- העתק וואדי מאליח.



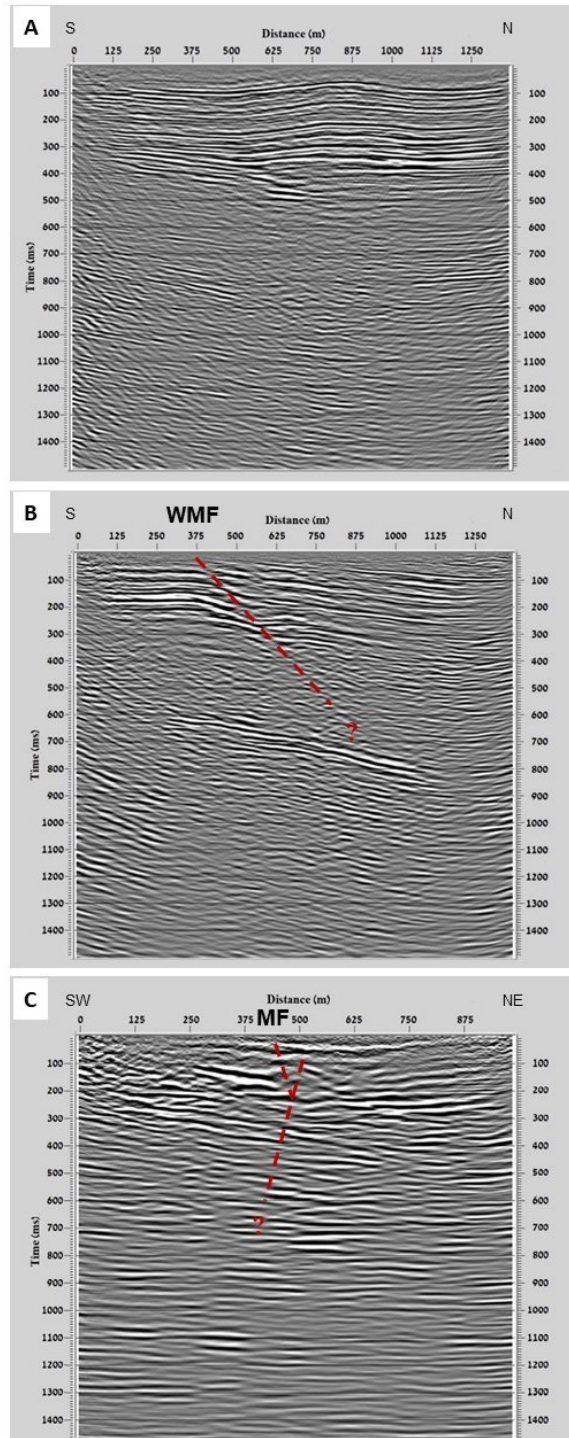
**איור 9.** נתוני קו סיסמי L11 שבוצע בחלקו המזרחי ביותר של גרבן הפריעה (לאורך כביש 90). מיקום הקו מוצג באיור 4. קווים מקווקוים אדומים מציינים העתקים בתת הקרקע. הקו הצהוב מציין את פני השטח, והקו הירוק מציין את בסיס תצורות הורדוס והליסאן (לא מחולק). שימו לב שלא נמצאה עדות בנתונים אלו להעתקת תצורות אלו.



**איור 10.** החלק הצפוני של המפה הגיאולוגית החדשה ובה מודגשים ההעתקים בצבעים שונים, על פי היחידות אותם הם מעתיקים. קווים שחורים מציינים העתקים שהעתיקו סלעים הקודמים לתצורת בירה מגיל מיוקן מאוחר. קווים ירוקים בהירים מציינים העתקים שהעתיקו את סלעי תצורת בירה. קווים צהובים מציינים העתקים שהעתיקו את סלעי תצורת גשר מגיל מיוקן מאוחר ועד פליוקן מוקדם. קווים כתומים מציינים העתקים שהעתיקו את סלעי תצורת ואדי מליח מגיל פלייסטוקן מוקדם. קווים אדומים מציינים העתקים שהעתיקו את סלעי תצורת הליסאן מגיל פלייסטוקן מאוחר. שימו לב ל"נדידת" ההעתקה מאז המיוקן המאוחר לכיוון צפון מזרח. ההעתק הצפון-מזרחי ביותר נמצא ליד חלקו המזרחי של ואדי מליח ודרום בקעת בית שאן. כל ההעתקים מדרום למפה זו ובתוך אזור המחקר נמצאו מעתיקים סלעים מגיל מיוקן מוקדם-תיכון או יחידות סלע קדומות יותר (קווים שחורים). SMF - העתק שדמות מחולה. MF - העתק מחולה. WMF - העתק הנתק ואדי מליח.



**איור 11.** מפת תבליט מוצללת המבוססת על נתוני ה-LiDAR המציגה את השפעת העתקי MF, SMF ו-WMF על נתיב הזרימה של ואדי מליח. החץ השחור מציג את מקום המפגש של העתק SMF עם ואדי מליח. במקום זה מתרחשת תזוזה שמאלית של כ-150 מ' במיקום הרכס ובעמק שיוצר ואדי מליח. חיצים כחולים מציינים שינויים בכיוון הזרימה של ואדי מליח במקום בו הוא חוצה את העתקי MF ו-WMF. העתק שדמות מחולה. MF- העתק מחולה. SMF- העתק שדמות מחולה. WMF- העתק העתק ואדי מליח.



**איור 12.** נתוני קווים סיסמיים שבוצעו בחלקו הצפוני של אזור המחקר. מיקומי הקווים מוצגים באיור 4. (A) קו סיסמי L12 שבוצע בחלקה הדרומי של בקעת בית שאן ואינו מציג עדות להעתקה בתוך דרום הבקעה. (B) קו סיסמי L13 ומיקומו של העתק ה-WMF, המסמן את הגבול הדרומי של בקעת בית שאן. (C) קו סיסמי L14 ומיקומו של העתק ה-MF. קווים מקווקיים אדומים מציינים מיקומי ההעתקים בתת הקרקע. - העתק שדמות מחולה. -MF העתק מחולה. -WMF העתק העתק ואדי מאלח.

## תחנות הסיור

חלק מהתצפיות העיקריות שנסקרו לעיל מפורטות מטה בסדרת תחנות במרחב אזור העבודה (איור 13) :

**תחנה 1.** תצפית על גרבן הפריעה וההעתק הגבול הדרומי של גרבן הפריעה (תרצה) (E35.44, N32.16).

**תחנה 2.** העתק הפריעה ותצפית על המגע בין סלעי האיאווקן השבורים והמילוי הקונגלומרטי של תצורת הורדוס מגיל מיוקן מוקדם-תיכון (E35.45, N32.17).

**תחנה 3.** תצפית על המפגש בין העתק הפריעה להעתק ים המלח (E35.50, N32.14).

**תחנה 4.** תצפית על העתקי הגבול הצפוני של גרבן הפריעה (E35.50, N32.15).

**תחנה 5.** תצפית על תצורת הורדוס שהושקעה צפונה לגרבן הפריעה ותצפית צפונה לכוון גרבן הבקיעה (N32.17, E35.49).

**תחנה 6.** תצפית על העתק הגבול הדרומי של גרבן הבקיעה בחלקו המזרחי ועל עיקול של 180 מעלות בערוץ הנחל המנקז את הבקיעה מזרחה (E35.52, N32.17).

**תחנה 7.** סיור רגלי לקצה המזרחי של גרבן הבקיעה. תצפית על העתקי השוליים של הגרבן ועל אופי השקעת תצורת הורדוס במרחב (E35.51, N32.20).

**תחנה 8.** אום זוקא. תצפית על גרבן תיאסיר ומרכז אנטיקלינת פריעה (N35.51, N32.28).

**תחנה 9.** תצפית על הקצה הדרום מזרחי של אזור השקעת תצורת בירה מגיל מיוקן מאוחר (E35.53, N32.30).

**תחנה 10.** תצורות בירה וגשר. תצפית על החתך אופייני מגיל מיוקן מאוחר עד פליוקן מוקדם (E35.53, N32.33).

**תחנה 11.** מרמה-פיאד- וולקניזם מגיל מיוקן מאוחר ותצפית על העתק שדמות מחולה והעתק שוליים של בקעת הירדן (E35.54, N32.33).

**תחנה 12.** העתק שדמות מחולה ותצורת ואדי מאליו (E35.53, N32.34).

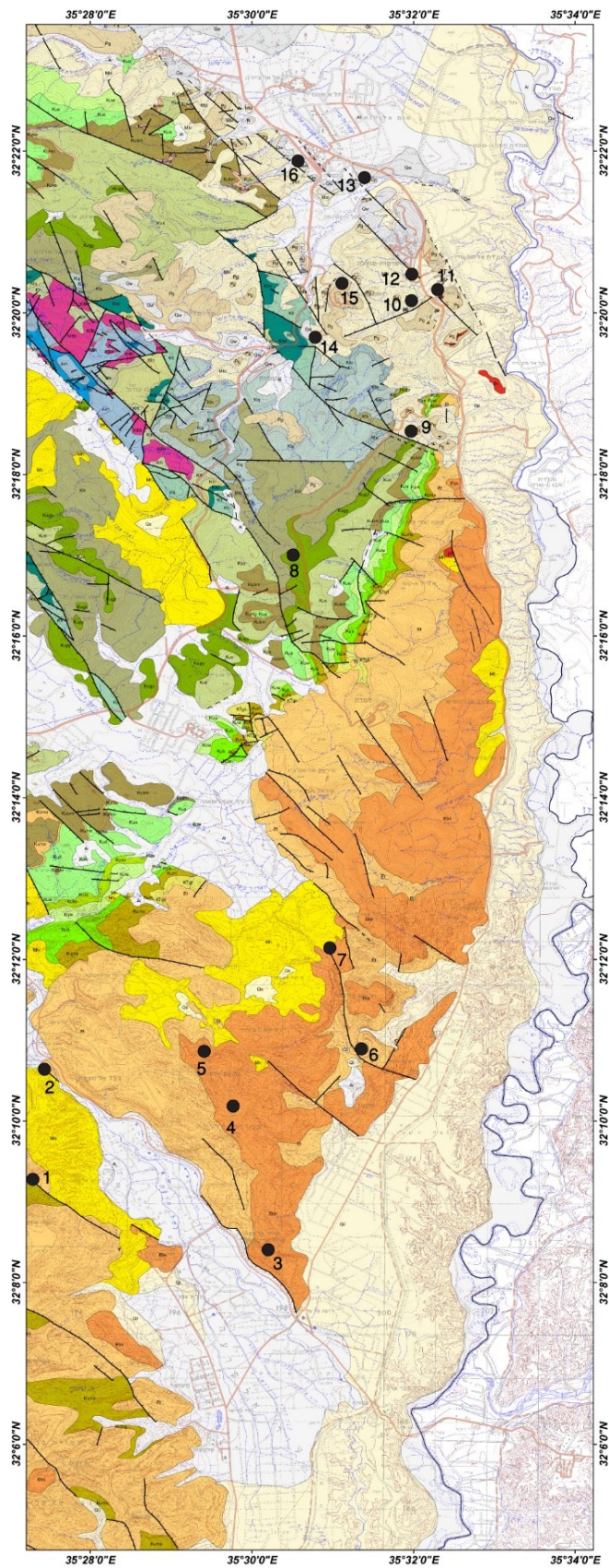
**תחנה 13.** תצפית על העתק ואדי מאליו וסיור להעתק מחולה והעתק שדמות מחולה והשפעתם על נתיב הזרימה של ואדי מאליו (E35.52, N32.36).

**תחנה 14.** ואדי מאליו ועלייה לבלוק רותם. תצפית על ליבת אנטיקלינת פריעה ועל מקור הסדימנטים לתצורת ואדי מאליו (E35.51, N32.32).

**תחנה 15.** תצפית מרותם לכיוון בקעת בית שאן. תצפית על העתקי הגבול הצפוני של אנטיקלינת הפריעה השבורים את תצורת בירה וגשר (E35.51, N32.33).

**תחנה 16.** גבעת סלעית. תצפית מזרחה על אזור המפגש של העתק ים המלח והעתק ואדי מאליו וסיכום התצפיות (E35.51, N32.36).





**איור 13.** מיקום תחנות הסיור על גבי המפה הגיאולוגית של האזור.

## סיכום, דיון ומסקנות

התצפיות שנסקרו בסיור מצביעות על שינויים דרמטיים במערך הטקטוני של הפיצול בין DSF ל-CGFS מאז המיוקן המאוחר. שינוי זה בא לידי ביטוי הן בסטרטיגרפיה והן במערך ההעתקים של אזור מפגש זה. כפי שתואר לעיל, ישנם מספר הבדלים עיקריים בין המפה החדשה, תוצר המחקר הנוכחי, למפות גיאולוגיות קודמות של אזור זה:

(א) בהתבסס על מאפיינים ליתולוגיים, תיארוך ויחסי שדה, מחשופים גדולים לאורך החלק הצפוני של אנטיקלינה פריעה, הגובלים עם בקעת בית שאן, אשר מופו בעבר כמחשופים בלתי מחולקים של תצורות הורדוס ואום סאבונה מתקופת המיוקן המוקדם עד התיכון (Shaliv et al., 1991; Mimran et al., 2016), נמצאו כשייכים לנאוגן המאוחר עד לפליוקן המוקדם. יחידות אלו כוללות את תצורות בירה מהמיוקן המאוחר וגשר מהמיוקן המאוחר – פליוקן מוקדם. (ב) חלק מהמחשופים שמופו במיפויים הקודמים כשייכים לתצורות הורדוס ואום סבונה נמצאו בעבודה הנוכחית כפסאודו-קונגלומרטים ממוצא פדוגני, המוכר בשם "נארי" מגיל פליוקן עד רביעון מוקדם, שנוצרו על ידי בליה ופדוגנזה של הסלעים החשופים.

(ג) נמצאו ומופו מחשופים חדשים של תצורת ואדי מליח הרביעונית.

(ד) בהתבסס על מאפיינים ליתולוגיים ויחסי שדה, מחשופים גדולים לאורך וליד גרבן פריעה אשר מופו בעבר כיחידות לא מחולקות מגיל ניאוגן-רביעון (Sneh et al., 1998) נמצאו כשייכים לתצורת הורדוס מגיל מיוקן מוקדם-אמצעי.

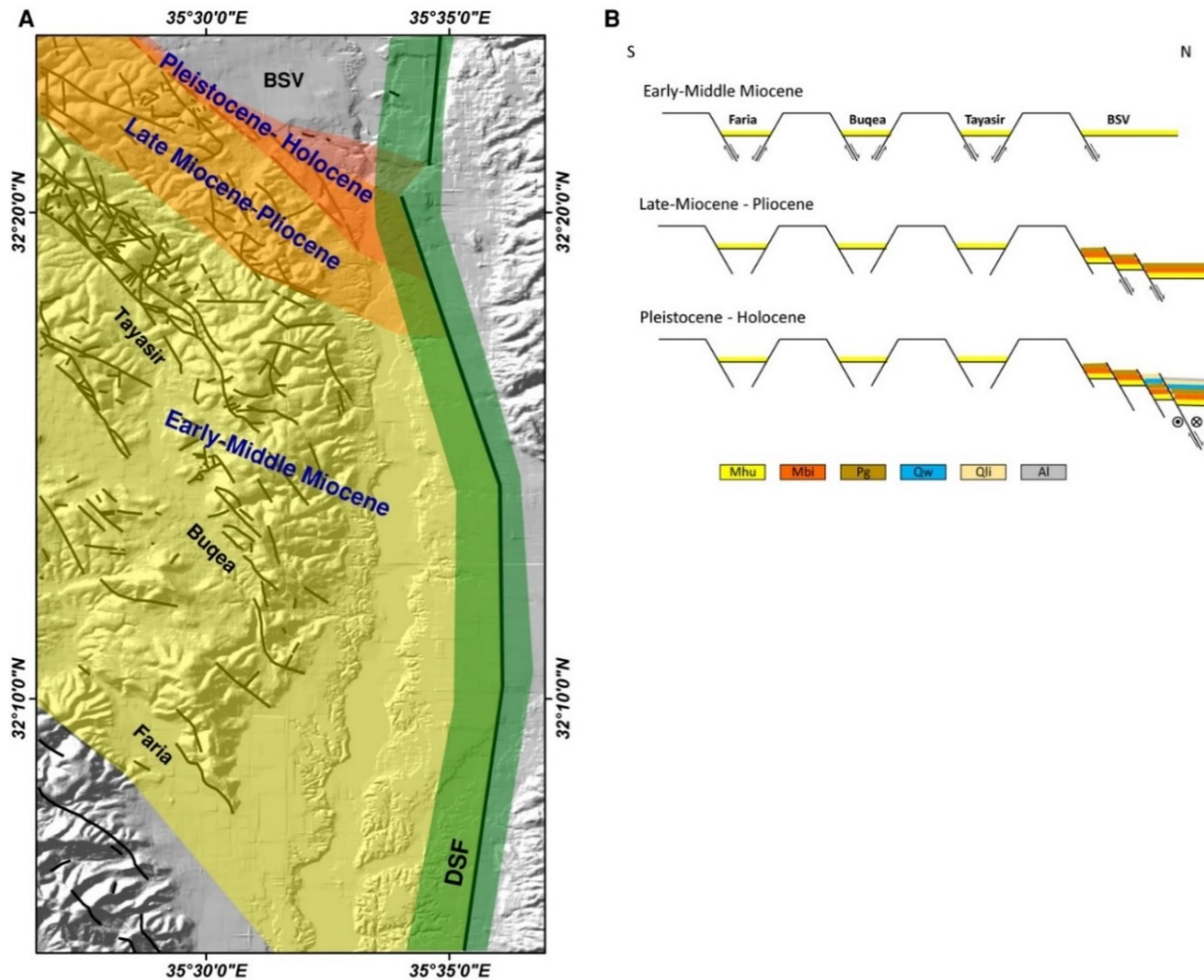
(ה) מחשופים חדשים של תצורת הורדוס המורכבים מקונגלומרטים פולימיקים המלוכדים על ידי קרבונט נמצאו ומופו בחלק הדרומי של אנטיקלינה פריעה, לאורך ובין הגראבנים של פריעה ובוקיעה.

(ו) נמצאו ומופו העתקים חדשים המעתיקים יחידות ניאוגניות ורבעוניות, במיוחד בגזרה הצפונית של אנטיקלינה פריעה. רובם הם העתקים נורמליים, ושניים מהם אלכסוניים, המדגימים שילוב של הסטה שמאלית והסטה נורמלית.

(ז) העתקים חדשים המסיטים יחידות פליוקניות ורבעוניות נמצאו רק בחלקה הצפוני של אנטיקלינה פריעה וחלקה הדרומי של בקעת בית שאן.

אנחנו מראים כי מאז המיוקן המאוחר לוח סיני עובר פיצול לאורך ה-CGFS. פיצול זה מלווה בנדידה צפונה והתמקמות של דפורמציה בגבול הדרומי של בקעת בית שאן. איור 14 מסכם את השלבים העיקריים של ההתפתחות הטקטונית במרחב. בתקופת המיוקן המוקדם-אמצעי, ה-CGFS הורכב מחגורת דפורמציה ברוחב של כ-35 ק"מ המשתרעת מהפריעה ועד עמקי בית שאן. חגורה זו נשלטה על ידי העתקה נורמלית, שיצרה גרבנים בכיוון צפון-מערב, כגון פריעה, בקיעה ותיאסיר. לאחר מכן, במהלך המיוקן המאוחר והפליוקן, הפעילות טקטונית נדדה צפונה אל חגורת דפורמציה של כ-6 ק"מ בצפון האנטיקלינה של פריעה (איור 14). מאז הפלייסטוקן המאוחר, הדפורמציה ממוקמת באזור של כ-1-2 ק"מ לאורך הגבול הדרומי של בקעת בית שאן (איור 14). בשלב זה ניתן לזהות בבירור העתקים נורמליים ושמאליים. העתק מרכזי באזור זה היא ה-WMF, אשר העתיק את תצורת ליסאן מגיל פלייסטוקן מאוחר (איורים 5, 10, 13). ההעתק מסתעף מה-DSF (בצד המזרחי של בקעת הירדן) ומזוהה כלינאמנט ברור שחוצה את בקעת הירדן. בנקודת ההסתעפות, בסמוך לבלוק המורם של אזור תל אל-קרן, קיימת "קפיצה" ימנית ושינוי בכיוון של ה-DSF (למשל, Ferry et al., 2007). העתק זה מגדיר את הגבול הנוכחי בין אנטיקלינה פריעה לבקעת בית שאן ומצביע על עדויות ברורות להעתקה נורמלית בתת-הקרקע. צפון מערבית לאזור המחקר שלנו, ההעתקים המאוחרים למיוקן-המאוחר מתחברים להעתק הגלובע (איור 1; Dembo et al., 2015; Sneh et al., 1998; Shaliv et al., 1991).

התמקמות הדפורמציה באזור בקעת בית שאן והעתק הגלבוץ תואם את תצפיות ה-GPS הנוכחיות (Hamiel and Piatibratova, 2021). תוצאות מחקר זה מדגישות את התרומה המשמעותית של ה-CGFS לדפורמציה האזורית ומצביעות על כך שרוב הדפורמציה בקטע המזרחי של ה-CGFS מתרחשת לאורך הגבול הדרומי של בקעת בית שאן (כלומר, ליד ה-WMF וה-MF), והתרומה הנוכחית לעיוות של העתק פריעה קטנה באופן זניח. התמקמות הדפורמציה ליד בקעת בית שאן והעתק הגלבוץ עולה בקנה אחד עם תצפיות פליאומגנטיות ומודלים מכניים (Dembo et al., 2015): Dembo et al. (2015), אשר הראו התמקמות של דפורמציה ליד העתקי הכרמל והגלבוץ באתרים צעירים מ-8 מ"ש. מחקרים קודמים מצביעים על כך ששינויים דרמטיים בקינמטיקה של הלוחות התרחשו בלבנט במהלך המיוקן המאוחר-הפליוקן המוקדם (למשל, Marco, 2007; Joffe and Garfunkel, 1987; Garfunkel, 1981). מחקרים אילו חילקו את הדפורמציה לאורך ה-DSF והאזורים הסובבים אותו לשני שלבים עיקריים, לפני ואחרי ~5 מ"ש. בשלב המעבר הזה, חל שינוי במיקום של קוטב אוילר של סיני-ערביה, שהוביל לשינויים בסגנון ובקצב העיוות, כמו גם במבנה הפנימי והלוקליזציה של מערכת ה-DSF (למשל, Joffe, 1981; Garfunkel, 2007; Garfunkel, 1987). לאורך ה-DSF, מצפון לאזור המחקר שלנו, בתוך שקעי הכנרת והחולה, שינויים וארגון מחדש של ההעתק הראשי והעתקי השוליים התרחשו ב-4-5 מ"ש בקירוב (למשל, Schattner and Heimann and Ron, 1993; Hurwitz et al., 2002; Weinberger, 2008; Heimann et al., 2009; Matmon and Zilberman, 2017). מחקרים אחרים מצביעים על כך ששינויים גדולים בטקטוניקת הלוחות האזורית ובמבנה ה-DSF התרחשו לפני כ-10 מ"ש. בערך בזמן הזה, החלה ההתנגשות של לוח ערב ולוח אירו-אסיה לאורך תפר ה-Bitlis (למשל, McQuarrie and van Hinsbergen, 2013), - ה-DSF השלים בשלב זה את התפתחו כגבול לוחות (למשל, Gomez et al., 2020), והפעילות הטקטונית לאורך אזור הגזירה של סיני-נגב הסתיימה (Weinberger et al., 2020). בדומה למחקרים אלו, באזור המחקר שלנו, שינוי משמעותי בדפורמציה הטקטונית נמצא לפני כ-10 מ"ש עם תחילת השקיעה של תצורת בירה. ניתוח מרחבי של המפה הגיאולוגית החדשה (איורים 5, 10) מראה נדידה של ההעתקה המאוחרת למיוקן המאוחר מדרום-מערב לצפון-מזרח, תוך כדי העמקה של בקעת בית שאן לכיוון צפון. הפעילות הוולקנית בדרום-מזרח אזור המחקר (המוכרת כ"וולקאנים של מרמה פייד") מתוארכת ל-5.65-5.90 מ"ש (Shaliv et al., 1991; Dembo et al., 2015) קשורה כנראה לאותו שלב טקטוני שהחל במהלך המיוקן המאוחר, והמשיך עד הפליוקן. הכיוון של רוב ההעתקים המאוחרים למיוקן המאוחר הוא בכיוון צפון מערב, חלקם בכיוון צפון-צפון מערב, ומיעוט קטן של ההעתקים בכיוון צפון. רבים מההעתקים הצפון-מערביים הם ככל הנראה התחדשות של העתקים שהתחילו בשלב הטקטוני של המיוקן המוקדם-תיכון או אפילו לפני כן, כפי שנראה בשלבים המוקדמים של ההעתקה לאורך ה-CGFS (למשל, Shaliv et al., 2014; Segev et al., 1991). לבסוף, אנו מציעים כי הנדידה צפונה והתמקמות של ההסתעפות בין ה-DSF ל-CGFS, שהתרחשה מאז המיוקן המאוחר קשורה כנראה לשינויים הטקטוניים ושדות המאמצים האזוריים הנזכרים לעיל, לשינוי במיקום קוטב אוילר של סיני-ערב ולהתמקמות של דפורמציה לאורך ה-DSF. אנו גם מציעים שהתצפיות שלנו יחד עם מדידות GPS נוכחיות (Hamiel and Piatibratova, 2021) מרמזות על פיצול לוח סיני מאז המיוקן המאוחר לחלק עיקרי המצוי מדרום לקן עמק בית שאן-גילבוץ – כרמל וחלק צפוני מצפון לקן זה.



**איור 14.** האבולוציה הטקטונית באזור המפגש בין ה-DSF ל-CGFS. (A) מפה של אזור המחקר, המציגה את אזורי הדפורמציה במהלך שלושת השלבים הטקטוניים העיקריים: המיוקן המוקדם-תיכון (אזור צהוב), המיוקן המאוחר-פליוקן (אזור כתום) והרביעון (אזור אדום). אזור הדפורמציה של ה-DSF, הפעיל מבחינה טקטונית מאז המיוקן המוקדם, מסומן בירוק. (B) חתך צפון-דרום סכמטי לאורך ה-CGFS, ממערב ל-DSF, המראה את ה"נדידה" והמיקוד של תהליכי ההעתקה במהלך שלושת השלבים הטקטוניים שהתרחשו מאז המיוקן המוקדם. רכיב ההעתקה הנורמלי היה המרכיב הדומיננטי של הדפורמציה לפני הפלייסטוקן. מאז הפלייסטוקן קיים שילוב של העתקה שמאלית והעתקה נורמלית. ה-DSF- העתק ים המלח. CGFS – מערכת ההעתקים של הכרמל-גלבע-פריעה. BSV- בקעת בית שאן.

## תודות

אנו מודים לפרח נוריאל ומריה אובצ'קין על עזרתם בתיארוך דגמאות הסלע. אנו מודים גם לאלכס בורשבסקי על עזרתו בעריכת המפה הגיאולוגית החדשה. מחקר זה נתמך על ידי ועדת ההיגוי הלאומית להערכות ישראל לרעידות אדמה והקרן הישראלית למדע (מענק 2091/20 - ISF).

- Achmon, M. and Ben-Avraham, Z., 1997, The deep structure of the Carmel fault zone, northern Israel, from gravity field analysis, *Tectonics*, 16(3), 563-569.
- Begin B.Z., Ehrlich A., Nathan Y., 1974, Lake Lisan—The Pleistocene precursor of the Dead Sea, *Geological Survey of Israel Bulletin*, p. 63.
- Ben-Avraham, Z., and Ginzburg, A., 1990, Displaced terranes and crustal evolution of the Levant and the eastern Mediterranean: v. 9, p. 613–622.
- Ben-Gai, Y., and Ben-Avraham, Z., 1995, Tectonic processes in offshore northern Israel and the evolution of the Carmel structure: *Marine and Petroleum Geology*, v. 12, p. 533–548, doi:10.1016/0264-8172(95)91507-L.
- Bentor, Y.K. 1961. Some geochemical aspects of the Dead Sea and the question of its age. *Geochim. Cosmochim. Acta* 25: 239-260.
- Dembo, N., Hamiel, Y., and Granot, R., 2015, Intraplate rotational deformation induced by faults: *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, v. 120, p. 7308–7321, doi:10.1002/2015JB012264.
- Eyal, M., Y. Eyal, Y. Bartov, and G. Steinitz, 1981, The tectonic development of the western margin of the Gulf of Elat (Aqaba) rift, *Tectonophysics*, 80(1-4), 39-66.
- Ferry, M., Meghraoui, M., Karaki, N.A., Al-Taj, M., Amoush, H., Al-Dhaisat, S., and Barjous, M., 2007, A 48-kyr-long slip rate history for the Jordan Valley segment of the Dead Sea Fault: *Earth and Planetary Science Letters*, v. 260, p. 394–406, doi:10.1016/j.epsl.2007.05.049.
- Freund, R., Garfunkel, Z., Zak, I., Goldberg, M., Weissbrod, T., and Derin, B., 1970, The shear along the Dead Sea: *Phil. Trans. Roy. Soc. Lond.*, v. A, p. 107–130.
- Garfunkel, Z., 1981, Internal structure of the Dead Sea leaky transform (rift) in relation to plate kinematics: *Tectonophysics*, v. 80, p. 81–108, doi:10.1016/0040-1951(81)90143-8.
- Garfunkel, Z., and Almagor, G., 1984, Geology and structure of the continental margin off northern Israel and the adjacent part of the Levantine Basin: *Marine Geology*, v. 62, p. 105–131, doi:10.1016/0025-3227(84)90057-4.
- Gomez, F., Cochran, W. J., Yassminh, R., Jaafar, R., Reilinger, R., Floyd, M., King, R. W., and Barazangi, M., 2020, Fragmentation of the Sinai Plate indicated by spatial variation in present-day slip rate along the Dead Sea Fault System, *Geophysical Journal International*, v. 221, p. 1913-1940.
- Hamiel, Y., and Piatibratova, O. (2021). Spatial variations of slip and creep rates along the southern and central Dead Sea Fault and the Carmel–Gilboa Fault System. *J. Geophys. Res.: Solid Earth*, 126, e2020JB021585. <https://doi.org/10.1029/2020JB021585>.

- Hamiel, Y., Piatibratova, O., and Mizrahi, Y., 2016, Creep along the northern Jordan Valley section of the Dead Sea Fault: *Geophysical Research Letters*, v. 43, p. 2494–2501, doi:10.1002/2016GL067913.
- Hamiel, Y., Piatibratova, O., Mizrahi, Y., Nahmias, Y., and Sagy, A., 2018, Crustal Deformation across the Jericho Valley Section of the Dead Sea Fault as Resolved by Detailed Field and Geodetic Observations: *Geophysical Research Letters*, doi:10.1002/2018GL077547.
- Hatzor, Y., and Reches, Z., 1990, Structure and paleostresses in the Gilboa' region, western margins of the central Dead Sea rift: *Tectonophysics*, v. 180, p. 87–100, doi:10.1016/0040-1951(90)90374-H.
- Heimann, A., and Ron, H., 1993, Geometric changes of plate boundaries along part of the northern Dead Sea transform: geochronologic and paleomagnetic evidence: *Tectonics*, v. 12, p. 477-491. doi: 10.1029/92TC01789.
- Heimann, A., Steinitz, G., Mor, D., Shaliv, G., 1996. The Cover Basalt Formation, its age and its regional and tectonic setting: Implications from K-Ar and  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  geochronology. *Isr. J. Earth Sci.*, 45, 55-69.
- Heimann, A., Zilberman, E., Amit, R., and Frieslander, U., 2009, Northward migration of the southern diagonal fault of the Hula pull-apart basin, Dead Sea Transform, northern Israel: *Tectonophysics*, v. 476, p. 496-511. doi: 10.1016/j.tecto.2009.07.024.
- Hofstetter, A., van Eck, T., and Shapira, A., 1996, Seismic activity along fault branches of the Dead Sea-Jordan Transform System: The Carmel-Tirtza fault system: *Tectonophysics*, v. 267, p. 317–330, doi:10.1016/S0040-1951(96)00108-4.
- Hurwitz, S., Garfunkel Z., Ben-Gai Y., Reznikov M., Rotstein Y., Gvirtzman H., 2002, The tectonic framework of a complex pull-apart basin: seismic reflection observations in the Sea of Galilee, Dead Sea transform, *Tectonophysics*, 359, pp. 289-306
- Joffe, S., and Garfunkel, Z., 1987, Plate kinematics of the circum Red Sea—a re-evaluation: *Tectonophysics*, v. 141, p. 5–22, doi:10.1016/0040-1951(87)90171-5.
- Krenkel E., 1924, Der syrische bogen, *zentralblatt fuer mineralogy, Geologie und Palaeontologie*, 9, pp. 274-281.
- Matmon, A., and Zilberman, E., 2017, Landscape Evolution along the Dead Sea Fault and its Margins. In Y. Enzel & O. Bar-Yosef (Eds.), *Quaternary of the Levant: Environments, Climate Change, and Humans* (pp. 17-30). Cambridge University Press. doi:10.1017/9781316106754.003.
- Marco, S., 2007, Temporal variation in the geometry of a strike–slip fault zone: Examples from the Dead Sea Transform, *Tectonophysics*, 445, 186–199.
- McKenzie, D.P., Davies, D., and Molnar, P., 1970, Plate Tectonics of the Red Sea and East Africa: *Nature*, v. V226, p. 243–248.

- McQuarrie, N., and van Hinsbergen, D.J.J., 2013. Retro deforming the Arabia–Eurasia collision zone: age of collision versus magnitude of continental subduction, *Geology*, 41, 315–318.
- Mimran Y., 1984, Unconformities on the eastern flank of the Fari'a anticline, and their implications on the structural evolution of Samaria (central Israel), *Israel Journal of Earth Sciences*, 33, pp. 1-11.
- Mimran, Y., Shaliv, G., Sakal, E., Sneh, A., 2016. The geological map of Israel, 1:50,000. Sheet 6-III, IV: Beqaot. *Isr. Geol. Surv.*, Jerusalem.
- Nuriel, P., Weinberger, R., Kylander-Clark, A., Hacker, B., and Craddock, J., 2017, The onset of the Dead Sea transform based on calcite age-strain analyses, *Geology*, v. 45, p. 587-590. doi: 10.1130/G38903.1.
- Picard L., 1943, Structure and evolution of Palestine with comparative notes on neighbouring countries, *Hebrew University Geological Department Bulletin*, 4 (1943), pp. 1-143
- Quennell, 1958, On the radiative properties of cirrus cloud at solar and thermal wavelengths: A test model consistency using high-resolution airborne radiance measurements: *Quarterly Journal of the Geological Society*, v. 114, p. 1–24, doi:10.1256/qj.03.151.
- Rozenbaum, A.G., Sandler, A., Zilberman, E., Stein, M., Jicha, B.R., Singer, B.S., 2016.  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  chronostratigraphy of late Miocene–early Pliocene continental aquatic basins in SE Galilee, Israel. *Geol. Soc. Am. Bull.*, doi: 10.1130/B31239.1.
- Rozenbaum, A.G., Sandler, A., Stein, M., Zilberman, E., 2019, The sedimentary and environmental history of Tortonian-Messinian lakes at the east Mediterranean margins (northern Israel), *Sedimentary Geology* 383, 268–292.
- Sadeh, M., Hamiel, Y., Ziv, A., Bock, Y., Fang, P., and Wdowinski, S., 2012, Crustal deformation along the Dead Sea Transform and the Carmel Fault inferred from 12 years of GPS measurements: *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, v. 117, p. 1–14, doi:10.1029/2012JB009241.
- Savage, H. M., and Brodsky, E. E., 2011, Collateral damage: Evolution with displacement of fracture distribution and secondary fault strands in fault damage zones, *J. Geophys. Res.*, 116, B03405, doi:10.1029/2010JB007665.
- Schattner, U., and Weinberger, R., 2008, A mid - Pleistocene deformation transition in the Hula basin, northern Israel: Implications for the tectonic evolution of the Dead Sea Fault: *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, v. 9. doi: 10.1029/2007GC001937.
- Schulman, N., 1962. The geology of the central Jordan Valley. Ph.D. thesis, Hebrew University of Jerusalem, 103 p. (in Hebrew).

- Schulman, N., and Rosenthal E., 1968, Neogene and Quaternary of the Marma Feiyad area south of Bet She'an, *Isr. J. Earth Sci.*, 17, 54-62.
- Segev, A., Lyakhovsky, V. and Weinberger, R., 2014, Continental transform–rift interaction adjacent to a continental margin: The Levant case study. *Earth-science reviews*, 139, pp.83-103.
- Shaliv, G., Mimran, Y., and Hatzor, Y., 1991, The sedimentary and structural history of the Bet She'an area and its regional implications, *Isr. J. Earth Sci.*, 40(1-4), 161-179.
- Sneh, A., Bartov, Y., Weissbrod, T. and Rosensaft, M., 1998, Geological Map of Israel, 1:200,000, *Isr. Geol. Surv.*, Jerusalem.
- Weinberger, R., Nuriel, P., Kylander-Clark, A. R., and Craddock, J. P., 2020, Temporal and spatial relations between large-scale fault systems: Evidence from the Sinai-Negev shear zone and the Dead Sea Fault. *Earth-Science Reviews*, 103377.