

הטקטוניקה של טרנספורם (בקע) ים המלח

צבי גרפונקל

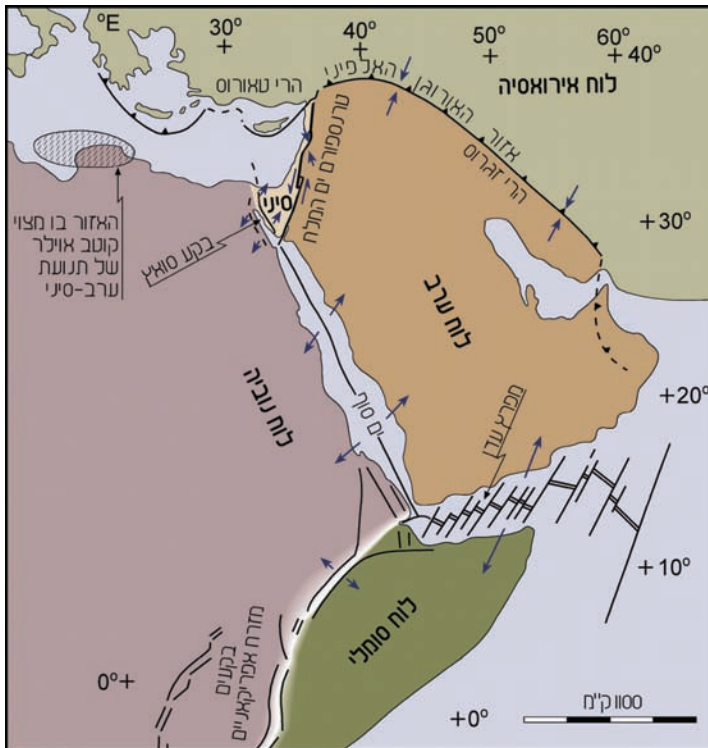
הקדמה

מבט על מפה או על תצלום לוויין של ארץ ישראל מגלה שתוואי הנוף הבולט ביותר בה הוא שקע צר הכולל את מפרץ אילת, הערבה, ים המלח ועמק הירדן. תוואי נוף שולטים כגון אלה נוצרים בדרך כלל בתהליכים גאולוגיים המופעלים על ידי כוחות בפנים כדור הארץ. במקרה שלנו מדובר בשקע שנוצר לאורך חלק מרצועת שברים הנמשכת מצפון ים סוף ועד דרום תורכיה, מרחק כאלף קילומטר. באופן מסורתי קראו לקו השבירה הזה 'בקע ים המלח' או 'בקע הירדן' או 'שבר הלונט', אבל בהמשך נראה שנכון יותר להשתמש במונח 'טרנספורם' במקום 'בקע'. מבחינה גאולוגית זה קו שבירה צעיר – הוא נוצר לפני פחות מ-20 מיליון שנה – והוא עדיין פעיל; משמעות העובדה הזו היא שהאזורים משני צדדיו ממשיכים לזוז זה ביחס לזה, אם כי לאט מאוד בקנה מידה אנושי. לתוזה הזאת יש ביטוי מוחשי, כי היא הגורם העיקרי לרעידות אדמה באזורנו אשר גורמות מדי פעם להרס ניכר. מטרתו של מאמר זה היא להבהיר כיצד נוצר והתפתח התוואי הגאולוגי הזה, ומהם התהליכים הגאולוגיים השולטים בהתפתחותו.

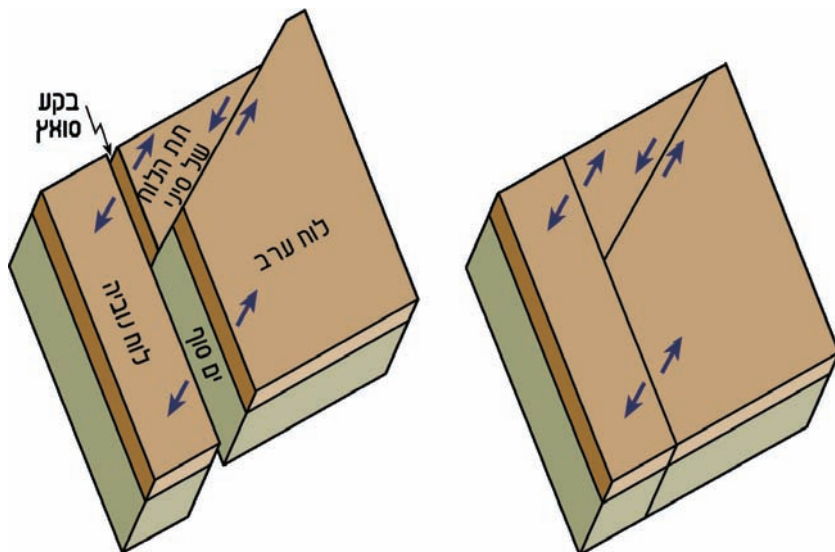
* צבי גרפונקל הוא פרופסור לגאולוגיה במכון למדעי כדור הארץ, האוניברסיטה העברית בירושלים.

התמונה הכללית

כיום מקובל לפרש מבנים גאולוגיים גדולים במסגרת טקטוניקת הלוחות – תורה העוסקת בלוחות. לפי תורה זו השכבה החיצונית של כדור הארץ, בעובי 100-200 קילומטר, מחולקת לפיסות בגדלים שונים ובצורות שונות הנקראות 'לוחות'. הלוחות נעים על פני כדור הארץ תוך שהם מחליקים על החומר החם יותר (ולכן גם הרך יותר) שמתחת להם. תנועה זו גורמת לתהליכים גאולוגיים שונים לאורך הגבולות שבין הלוחות, ובהם רעידות אדמה, פעילות וולקנית והתרוממות או השתפלות של שטחים גדולים. תהליכים כאלה מתרחשים גם בתוך הלוחות, אבל בעוצמה פחותה.



איור 1: מערך הלוחות באזורנו
הלוחות השונים מצוינים בצבעים שונים. החצים מראים את התנועה של כל לוח ביחס ללוח השכן.



איור 2: סכמה המראה את היחס בין התנועה לאורך טרנספורם ים המלח לפתיחת ים סוף

מימין: המצב המקורי; משמאל: המצב הנוכחי. יש לשים לב שפתיחת ים סוף מתחלקת בצפון בין בקע הסואץ לבין טרנספורם ים המלח, כאשר מרבית התנועה עוברת לטרנספורם. שינוי אופי התנועה מהיפרדות לוחות לאורך ים סוף להסטה אופקית לאורך הטרנספורם נובע מן ההבדל בין הכיוון שלהם ובין כיוון התנועה.

הלוחות העיקריים באזורנו הם לוח ערב, לוח נוביה (הכולל את רוב אפריקה) ולוח אירואסיה (איור 1). בקע ים המלח הוא חלק מהגבול שבין לוחות ערב ונוביה. דרומה יותר עובר הגבול בין לוחות אלה במרכז ים סוף. לאורך ים סוף הלוחות האלה מתרחקים זה מזה, ובצפונה ההתרחקות היא אלכסונית לים סוף, כמעט במקביל לבקע ים המלח (איור 2). לכן צדו המזרחי של הבקע (עבר הירדן, הרי אדום, ומדין) נע צפונה ביחס לצדו המערבי (סיני, הנגב, שדרת ההר של ארץ ישראל). להשלמת התמונה יש לציין (איור 1) שהבקעים במזרח אפריקה מפרידים בין לוח נוביה ללוח סומלי (שכולל חלק קטן מאפריקה), ושמפרץ עדן מפריד בין לוח ערב ללוח סומלי. מפרץ סואץ הוא בקע בין סיני לחלק העיקרי של הלוח של נוביה, אבל ההיפרדות ביניהם דועכת כלפי צפון ולכן סיני נחשב לתת-לוח, מעין ספח, של לוח נוביה. נוסף על כך לוח ערב

ולוח נוביה נעים צפונה ומתקרבים אל לוח אירואסיה; ביניהם מפריד גבול לוחות נוסף לאורך הצד הדרומי של אירואסיה. גבול כזה, שלאורכו נעים הלוחות זה לקראת זה, נקרא 'גבול התכנסות' או 'גבול התנגשות לוחות'. כאשר לוחות שכנים מתרחקים זה מזה, כמו לאורך ים סוף, הגבולות ביניהם נקראים 'גבולות היפרדות'. אולם לאורך בקע ים המלח התנועה בין הלוחות שמשני צדדיו נעשית במקביל לו. גבול לוחות מטיפוס כזה נקרא 'טרנספורם'; לפי טקטוניקת הלוחות זהו המונח הנכון ובו יש להשתמש. המונח 'בקע' מציין רצועות שבירה שהגושים משני צדדיהם מתרחקים זה מזה בזווית גדולה לכיוון השברים, וזה המצב לאורך בקע סואץ והבקעים שבמזרח אפריקה.

התמונה הזאת היא פרי מחקרים רבים שנעשו במשך תקופה ארוכה. גאולוגים חוקרים את טרנספורם (בקע) ים המלח במשך יותר מ-150 שנה. כבר לפני יותר ממאה שנה התברר שהוא הענף הצפוני ביותר של מערכת אזורי שבירה הנמשכת מהאזור שלנו דרומה, דרך ים סוף ואתיופיה למזרח אפריקה, לאורך כ-7,000 קילומטר. המערכת הזאת נקראה בעבר 'השבר הסורי-אפריקני', אבל השם הזה נזנח כאשר התברר תפקידם של מבנים אלה כגבולות בין לוחות והתקבל המינוח של טקטוניקת הלוחות. לכן, כדי להבין את טרנספורם ים המלח אי-אפשר להסתפק במחקר התופעות לאורכו ובסמוך לו, אלא יש להבין את מקומו במסגרת הרחבה יותר של מערכת הלוחות. רק שילוב שתי צורות ההסתכלות האלה מאפשר הבנה שלמה של התופעות.

במחצית הראשונה של המאה העשרים שלטה בעולם הדעה ששקעים המוגבלים על ידי שברים הם בקעים שנוצרו על ידי מתיחה, זאת אומרת ששני צדדיהם מתרחקים זה מזה בניצב לכיוון השקע. פירוש זה התבסס על תצפיות במזרח אפריקה ובאירופה. השקפה זו נראתה מתאימה גם למבנה שקע ים המלח ועמק הירדן, ולכן הייתה מקובלת על הגאולוגים שעבדו בארץ ובארצות הסמוכות, ובראשם פרופ' לאו פיקרד, מאבות הגאולוגיה בישראל. אבל כבר באמצע המאה הקודמת הובעה הדעה שכאן שולטת תנועה במקביל לרצועת השבירה, כלומר שקיימת הסטה אופקית. ברט קנל, חוקר שעבד בעבר הירדן, הסיק בשנות החמישים שהתנועה האופקית הייתה בגודל 107 קילומטר, ובה הצד המזרחי זו צפונה ביחס לצד המערבי. בשנות השישים פיתח את הרעיון הזה רפאל פרוינד מהאוניברסיטה העברית וחוקרים רבים המשיכו את עבודתו. בתחילה נראה הרעיון הזה בעייתי ועורר התנגדות, מפני ששברי הסטה

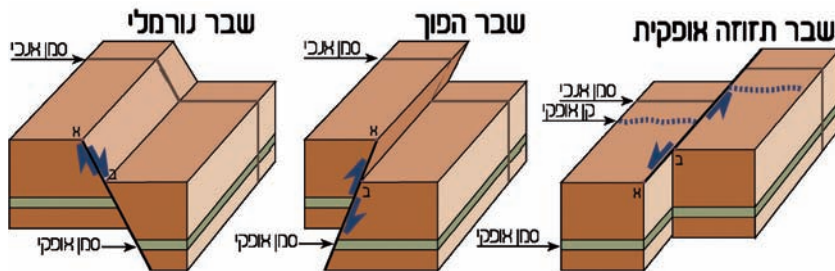
אופקית כמעט לא היו מוכרים. אבל במשך הזמן התברר שהם נפוצים בעולם, ושקיום הסטה אופקית גדולה משתלב היטב בטקטוניקת הלוחות. לכן, כאשר מחקר הגאולוגיה של אזורנו התקדם והניב מספר רב של תצפיות חדשות שהצביעו על הסטה אופקית, ובה בעת התקבלה טקטוניקת הלוחות כבסיס להבנת הפעילות הטקטונית של כדור הארץ, היה הפירוש הזה לדעה השלטת. הדברים בהמשך יסבירו את התצפיות והשיקולים שהביאו למסקנה זו וכיצד אפשר לפרש בעזרתה את פרטי המבנה של ים המלח.

עדויות אזוריות להסטה אופקית

קווי שבירה הם סדקים בקרום כדור הארץ שהגושים משני צדדיהם זוו (ולפעמים עדיין ממשיכים לזוז) האחד ביחס לשני. השאלה הבסיסית המתעוררת לגבי כל שבר (או רצועת שברים) היא מה היה גודל (כיוון ומרחק) התנועה לאורכו וכיצד קובעים זאת.

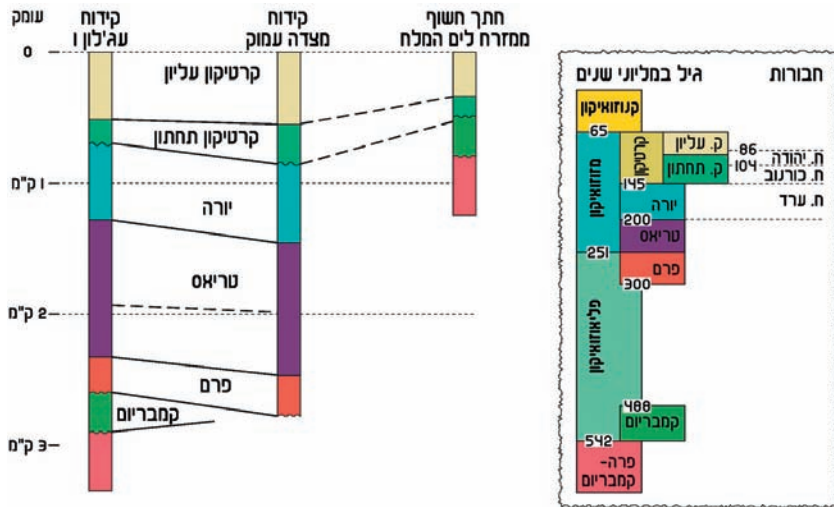
במקרה של שברים פעילים אפשר לפעמים לצפות בתנועה המתרחשת על השברים בזמן רעידות אדמה. לאחר רעידות אדמה חזקות אפשר לקבוע את התנועה מבדיקה של הגלים הסייסמיים (זה אפשרי בכל מקרה, גם אם אין גישה לשבר, למשל אם הוא מתחת לפני הים). נתונים סייסמיים של הרעידות החזקות ביותר לאורך טרנספורם ים המלח שהתרחשו במאה שעברה – בשנת 1927 (עמק הירדן הדרומי או אזור ים המלח) ובשנת 1995 (מרכז מפרץ אילת) – מתעדים אירועי הסטה אופקית בסדר גודל של מטר, כאשר הצד המזרחי של השבר זו צפונה ביחס לצדו מערבי. תנועה כזאת נקראת תנועה שמאלית, כי צופה העומד בצד אחד של השבר רואה את הצד האחר זו שמאלה. גם רעידות אדמה חלשות, המלוות בהסטות קטנות בהרבה, נוצרו במקרים רבים על ידי הסטה שמאלית, אבל במקרים אחרים התנועה הייתה שונה, מה שמעיד על סיבוכים משניים במבנה. נוסף על כך, כאשר ניתן לגשת לשבר אפשר לקבוע את התנועה על סמך שינויים שחלו לאורכו כמו קריעה והזזה של תוואי קרקע, של מבנים, של כבישים וכולי. ידוע לנו על הסטה אופקית של כשני מטרים של חומה במבצר עטרת, מבצר צלבני ליד גשר בנות יעקב, והסטה של כ־13 מטר של אמת מים רומית בסוריה.

תצפיות אלה מוכיחות שבאלפי השנים האחרונות התרחשה הסטה שמאלית לאורך הטרנספורם בקצב ממוצע של מ"מ אחדים לשנה. כיצד אפשר לקבוע את ההסטה שהתרחשה בעבר הגאולוגי? המפתח לכך הוא שתנועה לאורך שבר גאולוגי מזיזה גופי סלע ומבנים בגושים הגובלים בו, ואשר לפני השבירה נמשכו ברציפות מגוש אחד לשני. ההסטה של אלמנטים כאלה, המשמשים סמנים, מודדת את גודל התנועה וכיוונה. הדבר דומה לשחזור תמונה שנקרעה לשני חלקים על ידי התאמה של פרטי הציור. שכבות סלע אופקיות יכולות לשמש סמנים לזיהוי המרכיב האנכי של התנועה, ואילו דייקים אנכיים (סדקים שלתוכם זרמה מגמה) או רצועות סלע צרות מהווים סמנים טובים למדידת ההסטה האופקית (ציור 3). לפעמים אפשר לחשב תנועה לאורך קו שבירה נתון אם תנועת הגושים משני צדדיו נקבעה על סמך נתונים ממקומות אחרים. זה שימושי מאוד בדיון בלוחות, כפי שנראה בסעיף הבא. כרגע נתרכז ביישום השיטה הראשונה.



איור 3: השפעת שברים מסוגים שונים על סמנים אנכיים ואופקיים שברים נורמליים והפוכים: התנועה לאורכם איננה כוללת מרכיב אופקי במקביל לשברים. שברים כאלה מסיטים סמנים אופקיים; הבדלי הגובה ביניהם משני צדדי השבר מודדים את המרכיב האנכי של התנועה; לעומת זאת במבט מלמעלה, כפי שמראה המפה, אין הסטה של סמנים אנכיים שכיוונם ניצב לשבר. התנועה על שברים אלה כוללת מרכיב אופקי בניצב להם (רואים זאת על ידי השוואה של מיקומן של נקודות כמו א' ו'ב', שהיו במקור סמוכות זו לזו, משני צדי השבר. במבט מלמעלה, כפי שמראה המפה, מרחיקים אותן שברים נורמליים זו מזו ושברים הפוכים מסיטים אותן זו לקראת זו).

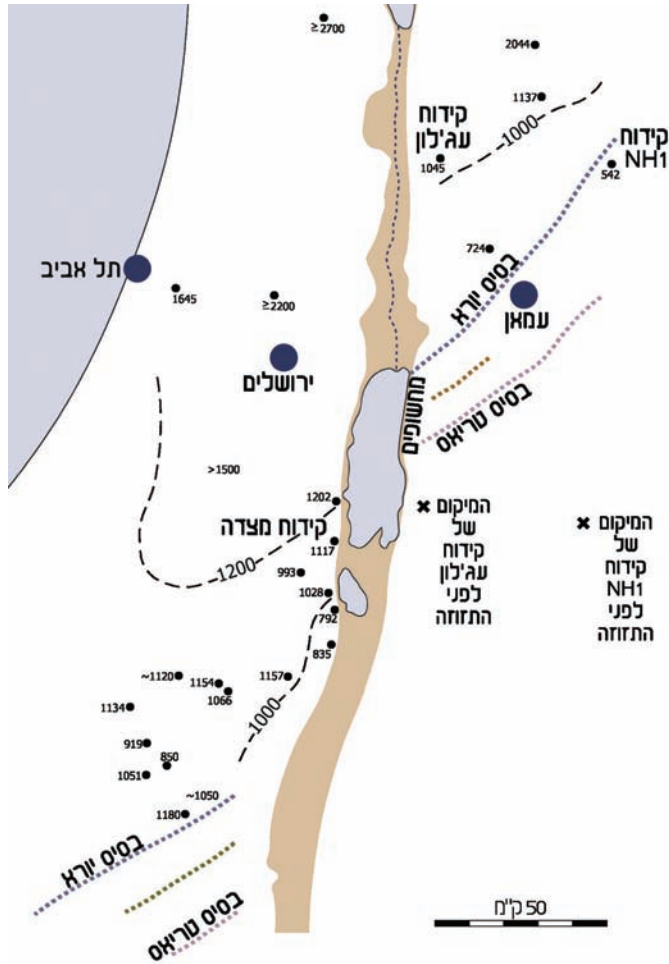
שברי הסטה אופקית אינם משנים את גובהם של סמנים אופקיים משני צדי השבר, אבל יוצרים אירציות בסמנים אנכיים או בסמנים קווים. ההסטה שלהם במבט מלמעלה כפי שמראה המפה, מודדת את התנועה האופקית לאורך השבר.



איור 4: השוואה בין חתכים משני צדי הטרנספורם מימין: לוח התקופות הגאולוגיות הנזכרות במאמר; משמאל: השוואה בין החתכים שממזרח לים המלח מול מצדה, בקידוח מצדה, ובקידוח עגילון. באיור ניכר הבדל גדול בין החתך בקידוח מצדה לחתך שמולו, ממזרח ים המלח; לעומת זאת בולט הדמיון בין החתך שבקידוח מצדה לבין הקידוח בעגילון שממזרח לים המלח הממוקם כמאה קילומטר צפונה יותר (ראו מיקום הקידוחים באיור 5).

במקרה שלנו, התצפית החשובה היא שגופי הסלע והמבנים הנמצאים כיום זה מול זה משני צדי טרנספורם ים המלח שונים זה מזה לכל אורכו, אבל שחזור הסטה אופקית שמאלית של כ-105 קילומטר (בדיוק של קילומטרים אחדים) מביא אלה מול אלה את כל האלמנטים הדומים שהוכרו עד כה משני צדדיו. זאת בדיוק התוצאה הצפויה של הסטה אופקית. צריך לדמיין סדרת אירועים מיוחדת מאוד ולא סבירה במשך כל ההיסטוריה הגאולוגית של אזורנו כדי שייוצר מצב כזה ללא הסטה אופקית. ידוע על מספר רב של סמנים מוסטים, אך במסגרת זו נראה רק דוגמאות אחדות.

קידוח עמוק ליד מצדה גילה חתך עבה של סלעי משקע (סלעים סדימנטריים) מגיל פרם, טריאס, יורה וקרטיקון (100-300 מיליון שנה), אבל בחתך החשוף מול מצדה, ממזרח לים המלח, אין סלעים מגיל פרם, טריאס ויורה, וסלעי הקרטיקון דקים במידה משמעותית מאלה שבמצדה (איור 4). לעומת זאת



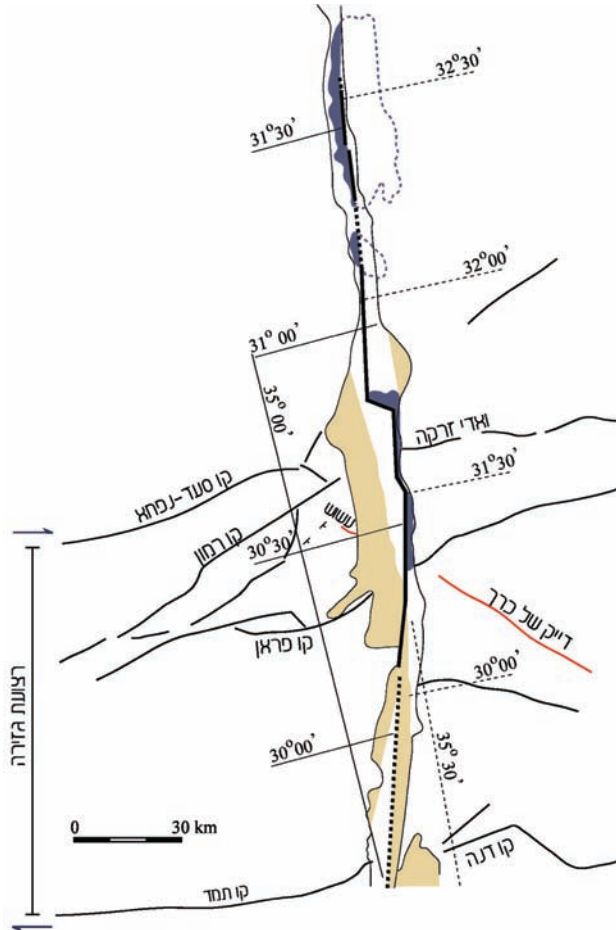
איור 5: תפוצת סלעי הטריאס בישראל ובירדן (המידע מבוסס ברובו על קידוחים) המספרים מציינים את עובי החתך של הסלעים הטריאסיים במטרים במחשופים או בקידוחים שחדרו דרך סלעי הטריאס. קווים מרוסקים הם קווים שווי עובי (במטרים). קווים מנוקדים – קווי הגידוע של אופקים שונים על ידי ארוזיה בקרטיקון המוקדם: של גג סלעי הטריאס ובסיס סלעי היורה (שמדרום לו אין סלעי סלעי יורה לא במחשופים ולא בקידוחים) ושל בסיס סלעי הטריאס שמדרום לו אין סלעים טריאסיים). קו מנוקד חום – כנ"ל, עבור אחת מהתצורות של סלעי הטריאס. רואים היטב את אי-הרציפות לאורך טרנספורם ים המלח. אי-הרציפות נעלמת כאשר משחזרים תנועה שמאלית של 100-110 קילומטר לאורך טרנספורם ים המלח (כלומר, כאשר מסיטים את הצד המזרחי דרומה ביחס לצד המערבי).

החתך במצדה דומה מאוד לחתך שנמצא בקידוח עג'לון שבעבר הירדן, כ- 110 קילומטר מצפון למצדה. הדמיון אינו מסתכם רק בעובי היחידות השונות אלא גם בהרכבן (למשל תכולת אבני חול, אבני גיר). מנגד, החתך מגיל היורה המאוחר והקרטיקון בקידוח עג'לון שונה מהחתך מאותו גיל המוכר בצפון השומרון שממערב לו (החתך בשומרון דומה לחתך שבדרום החרמון). אפשר להשוות לא רק נקודות בודדות משני צדי הטרנספורם, אלא גם יחידות סלע בעלות תפוצה נרחבת בפני השטח ו/או בתת־קרקע. מפה המראה, למשל, את עובי הסלעים מגיל טריאס (הידועים מכמה מחשופים, אבל בעיקר מקידוחים רבים) מראה אי־רציפות בולטת לאורך הטרנספורם (איור 5). זה נכון גם לגבי הקווים שלאורכם נגדעו יחידות משנה טריאסיות על ידי הארוזיה שהתרחשה לפני יצירת סלעי הקרטיקון. כל המאפיינים הללו הם בעלי כיוון אחיד באזור, למרות אי־הרציפות לאורך הטרנספורם. שחזור הסטה שמאלית של בערך 105 קילומטר לאורכו מתאים את כל האלמנטים הללו. שחזור כזה 'מתקן', כאמור, גם את אי־הרציפות של חלקי החתך העתיקים והצעירים מהטריאס, כפי שצפוי במקרה של הסטה אופקית.

דוגמה אחרת הם הסלעים הקמבריים של אזור אילת (בני כ- 515 מיליון שנה). הם אינם מצויים ממזרח לעקבה אבל דומים לחתכים מגיל זהה באזור פונון שבהרי אדום. החתכים הללו דומים בעוביים ובהרכבם – למשל בהימצאות ריכוזים גבוהים של מינרלים של נחושת – ובשני המקרים ניכר שינוי כלפי דרום מחתך של סלעי משקע ימיים לחתך יבשתי. למעשה כל קטעי החתך מכל הגילים עד האאוקן (זאת אומרת מלפני כ- 40 מיליון שנה) המוכרים משני צדדי הטרנספורם מהחרמון ומדרום הלבנון ודרומה, מראים תופעה זהה – העדר המשכיות ושנוי של חתכים בני אותו גיל המצויים זה מול זה משני צדדי הטרנספורם, ודמיון רב בין חתכים המוסטים שמאלה למרחק של 100-110 קילומטר.

כיוון שהשינויים בעובי ובהרכב של חתכים של סלעי משקע הם הדרגתיים, הרי סמנים אלה הם רחבים ומאפשרים לקבוע את גודל התנועה בדיוק של עד 10-15 קילומטר בלבד. הערכה מדויקת יותר מסתמכת על התאמה של רצועות שבירה וקימוט בכיוון קרוב למזרח־מערב, הנמשכות למרחק של כ- 200 קילומטר משני צדדי הטרנספורם. כיום הן אינן חוצות את הטרנספורם, אבל בהחלט אפשר להתאים ביניהן על ידי שחזור הסטה שמאלית של כ- 105 קילומטר

(איור 6). כיוון שאלה רצועות צרות, ההתאמה היא בדיוק של קילומטרים ספורים. חשוב מאוד להדגיש שקביעה זו תואמת את ההסטה המתקבלת מניתוח הסמנים בחתך הסדימטרי.



איור 6: שחזור קווי הפרעה ושכירה משני צדי הטרנספורם הקו העבה מציין את המגע בין הגושים משני צדי הטרנספורם; קו החוף של ים מלח נכלל על מנת להמחיש את גודל השחזור. כיום אין לקווי המבנה האלה המשך מהצד השני של הטרנספורם, אבל השחזור הזה מתקן את איי-הרציפות. שחזור זה מביא גם זה מול זה את כל גופי הסלע בני אותו גיל המוכרים משני צדי הטרנספורם (ראו איור 4) ומתקן את איי-הרציפות הגאולוגית לאורכו. יש לשים לב שהשחזור הזה מביא את הדייק של כרך בירדן מול הלוע הוולקני והדייק בנחל עשוי.

לשחזור ההסטה יש תוצאה מעניינת שלא הייתה צפויה מלכתחילה: היא מביאה זה מול זה שני גופים של בזלת בני כ־20 מיליון שנה שהם יחידים במינם בסביבתם – דייק ארוך מאוד המגיע לעיר כרך שבירדן ולוע וולקני ודייק קטן באותו כיוון בנחל עשור שבנגב (איור 6). מאוחר יותר הסתבר שהגופים האלו שייכים למערכת דייקים גדולים וארוכים הנמשכת דרומה מירדן לסעודיה. אלה הם הגופים הצעירים ביותר המראים את ההסטה הכוללת של הטרנספורם.

דוגמאות אלה מראות שהפירוש שלאורך טרנספורם ים המלח התרחשה הסטה שמאלית של כ־105 קילומטר עומד בשני מבחנים יסודיים הנדרשים מכל פירוש מדעי. ראשית, אין בו סתירות פנימיות מפני שכל הסמנים הידועים מצביעים על אותה תנועה. שנית, וחשוב יותר, הוא עמד במבחן של אימות/הפרכה לאור נתונים חדשים, שהוא תנאי הכרחי לקבלתו של פירוש מדעי. הפירוש שלנו מחייב שכל גוף סלע (עתיק מהסטה) המוכר בצד אחד של הבקע אינו נמשך לצד השני, אבל צפוי שיש גוף דומה לו בצד השני במרחק כ־105 קילומטר. כאשר הוצע לראשונה שלאורך הטרנספורם הייתה הסטה אופקית גדולה הידוע היה מוגבל, ולכן תגליות חדשות אפשרו לבחון שוב ושוב את התחזית הזאת. עד עכשיו עמדה תחזית זו במבחן של ממצאים חדשים עשרות פעמים ולא נסתרה אף פעם. כמובן, עניין זה ישוב וייבחן לאור ממצאים בעתיד.

בתחום זה ישנם שני אתגרים בולטים. ראשית, לבחון אם תפוצת הסלעים המגמתיים והמטמורפיים העתיקים מגיל הפרה־קמבריום, החשופים לאורך הטרנספורם בהרי אדום, בהרי אילת ומשני צדדי מפרץ אילת, מתאימה להסטה לאורך הטרנספורם. מצפון לאילת, בהר עמרם ובהרי נשף, נחשפים סלעים וולקניים אשר אינם נמשכים ממזרח לערבה אבל מצויים, באזור פונון. מאסף הסלעים המגמתיים של אזור עקבה שונה מהסלעים הפרה־קמבריים של אזור אילת, שחלק גדול מהם מטמורפיים, אבל דומה, כצפוי, לסלעים של אזור נואיבה שבסיני. ברם, הידוע הנוכחי אינו מפורט דיו כדי לקבל תמונה מדויקת ושלמה של ההסטה. שנית, סמנים מוסטים לא זוהו מצפון לתרמון ולדרום לבנון, אבל גם לא גופי סלע המשכיים משני צדדי הטרנספורם. כדי לבחון בפירוט אם יש סמנים מוסטים צריך לחכות לנתונים נוספים.

נקודת המבט של טקטוניקת הלוחות

טקטוניקת הלוחות התפתחה מההשערה על נדידת היבשות שהציע אלפרד וגנר בתחילת המאה הקודמת. הוא סבר שים סוף נוצר מהיפרדות אלכסונית של חצי האי ערב מאפריקה. לואי דוברטרה – חוקר שעבד בלבנון משנות השלושים ועד שנות החמישים של המאה הקודמת – שם לב לכך שסברתו של וגנר מחייבת להסיק שמצפון לים סוף נע חצי האי ערב ביחס לסיני במקביל לבקע ים המלח, כמתואר באיור 2. הוא העריך שהתנועה הייתה בגודל של כ-150 קילומטר, מפני שלא הביא בחשבון שחלק מהיפרדות אפריקה מערב נספג לאורך הבקע של מפרץ סואץ והניח שכל התנועה התרחשה לאורך בקע ים המלח (השם 'טרנספורם' עוד לא היה קיים בזמנו). רעיונות אלה על יצירת ים סוף אושרו ופותחו בסוף שנות החמישים ובשנות השישים של המאה הקודמת והשתלבו בטקטוניקת הלוחות שהתפתחה אז. הדבר החשוב כאן הוא שפתיחת ים סוף, התנועה לאורך טרנספורם ים המלח ופתיחת בקע הסואץ קשורות בצורה הדוקה זו לזו, מפני שכולן מבטאות את התנועה בין לוחות ערב ונוביה (איור 1).

עדויות רבות מראות שגבולות הלוחות באזורנו צעירים מבחינה גאולוגית. הם נוצרו כאשר לוח גדול אשר כלל את ערב, סיני ואפריקה (שהיו פעם יבשת אחת רצופה) נשבר והתפרק ללוחות נפרדים. תהליך כזה של התפרקות יבשות, שהתרחש פעמים רבות בתולדות כדור הארץ, מתחיל בדרך כלל ביצירת בקעים (ולכן התהליך נקרא 'ביקוע'). כך נוצרו בקעים לאורך מפרץ עדן, ים סוף ומפרץ סואץ, וגם במזרח אפריקה. כאשר חלקי היבשת השבורה החלו להתרחק זה מזה הם הפכו ללוחות עצמאיים ולכן הבקעים שביניהם נחשבים לגבולות של לוחות חדשים. ברם מבנים אלה התפתחו באופנים שונים. חצי האי ערב התרחק מאוד מאפריקה, ולכן לאורך הבקעים של ים סוף ומפרץ עדן נקרע הקרום היבשתי ובין גושי היבשת המתרחקים נפתח שטח בעל תכונות של אוקיינוס (קרום שונה מיבשות, אגן ימי בעומק קילומטרים אחדים). אלה הם אוקיינוסים עובריים הממשיכים להתרחב ככל שתנועת הלוחות נמשכת. כל האוקיינוסים הגדולים נוצרו באופן כזה, אלא שהם זקנים בהרבה ולכן הספיקו להתרחב לכדי אלפי קילומטרים. לעומת זאת גושי היבשת משני צדדי הבקעים במזרח אפריקה לא התרחקו מספיק כדי ליצור שטח אוקייני. תוצאה חשובה

של הבנת תהליכים אלה היא האפשרות של תיאור כמותי של תנועת הלוחות – הן של גודל וכוון התנועה וכיוונה והן של גילה והקצב שלה. אפשר לקבוע את גודל התנועה שבין לוחות ערב ונוביה על סמך רוחב השטח האוקייני החדש שנוצר בים סוף ומסכת השבירה בשוליו, ועל ידי שחזור סמנים רבים ביבשות משני צדדיו. כיוון שהלוחות נעים על פני כדור, אפשר לתאר את התנועה בין כל שני לוחות על פני כדור הארץ כסיבוב סביב נקודה מסוימת שנקראת 'קוטב אוילר' (על שם מתמטיקאי ידוע שהוכיח זאת). הקוטב של התנועה בין לוחות ערב ונוביה נמצא באזור צפון-מזרח לוב. כיוון שמדובר בתנועה סיבובית, היא הולכת וקטנה ככל שמתקרבים לציר הסיבוב מבערך 300 קילומטר (\pm כ־20 קילומטר) בדרום ים סוף ועד 130-140 קילומטר בצפון, ושם דומה כיוון התנועה לזה של מפרץ אילת. חלק מתנועה זו מתבטא בהפרדות סיני מאפריקה, אבל מבנה הבקע לאורך מפרץ סואץ, הידוע היטב בזכות קידוחי נפט רבים, מראה שמדובר בהתרחקות של 20-30 קילומטר בלבד. השאר – תנועה שמאלית של קצת יותר מ־100 קילומטר – חייב להתרחש לאורך טרנספורם (בקע) ים המלח.

ניתוח זה, המדגים את היכולת של טקטוניקת הלוחות, מבוסס על נתונים מים סוף בלבד ואיננו תלוי כלל בנתונים מהטרנספורם. בכל זאת הוא מביא לאותה מסקנה – על הסטה אופקית שמאלית של קצת מעל 100 קילומטר, המספר שהוסק מניתוח תפוצת הסלעים והמבנים לאורך הטרנספורם. האפשרות להגיע למסקנה זהה על בסיס נתונים שונים שאינם תלויים כלל זה בזה היא אחד המבחנים החשובים שפירוש מדעי יכול לעמוד בהם.

טקטוניקת הלוחות מספקת גם מסגרת להבנת ההיסטוריה של התנועה. כאמור, דייקים בני כ־20 מיליון שנה הם הסמנים הצעירים ביותר המוסטים על ידי התנועה הכוללת על הטרנספורם, מה שמוכיח שההסטה צעירה יותר. תחילת הפעילות הוולקנית לאורך עמק הירדן המרכזי ויצירת אגנים לאורך הטרנספורם (בים המלח, באזור הכנרת) לפני 17-18 מיליון שנה, מבטאות כנראה את תחילת התנועה לאורכו. לפי האמור זה צריך להתבטא גם בהיסטוריה של ים סוף. נתונים מים סוף ומפרץ עדן מראים שהביקוע לאורכם התחיל לפחות 10 מיליון שנה מוקדם יותר, אבל לפני כ־17 מיליון שנה ההתרחקות של לוח ערב מלוחות נוביה וסומלי נעשתה מהירה יותר בשיעור משמעותי מאשר קודם לכן. נראה שעד אז נפרדו לוחות ערב ונוביה לאורך ים סוף

ומפרץ סואץ, וההיפרדות בין ערב ונוביה הואצה רק כאשר החלה תזווה גם לאורך טרנספורם ים המלח. מאז רוב התנועה בין לוחות אלה מצפון לים סוף מתרחשת לאורך הטרנספורם (השוו עם איור 2).

ומה לגבי תקופות צעירות יותר? לאורך הטרנספורם אין סמנים צעירים יותר מ־20 מיליון שנה שאפשר לקבוע את ההסטה שלהם, אבל אפשר להשתמש בנתונים מים סוף. כאמור שם נוצר קרום מטיפוס אוקייני. קרום כזה בנוי מסלעים וולקניים המכילים מינרלים מגנטיים, ואלה רושמים את השדה המגנטי של כדור הארץ שהתקיים בזמן יצירתם (שדה זה מאפשר שימוש במצפן). ידוע שהשדה המגנטי של כדור הארץ השתנה בתקופות הגאולוגיות, ושינויים אלה נרשמו על ידי הסלעים הוולקניים שהתפרצו והתמצקו בזמנים שונים. מדידת המגנט של הסלעים הוולקניים שנוצרו במקום שבו נפתח אוקיינוס מאפשרת לקבוע כמה שטח אוקייני חדש נוצר בתקופות שונות, דהיינו באיזו מידה התרחקו הלוחות זה מזה. כך נמצא שבחמישה מיליון השנים האחרונות נוצרה במרכז ים סוף רצועה של קרום חדש ברוחב של 70-80 קילומטר בקצב די קבוע. הגאומטריה של תנועת הלוחות מאפשרת לחשב שבאותו זמן ההסטה לאורך טרנספורם ים המלח הייתה בערך 30 קילומטר, כלומר בקצב ממוצע של שישה מ"מ לשנה. בעשורים האחרונים מודדים את תנועת הלוחות בעזרת לוויינים. התנועה הנוכחית אינה זהה בהכרח לממוצע ארוך הזמן הנ"ל, אבל התוצאות עד עכשיו (שאינן סופיות) מראות על קצב דומה.

למען השלמות נשוב ונציין שלוחות ערב ונוביה נעים צפונה ביחס לאירואסיה ומתנגשים בה בקצב של כ־1.5 ו־1.0 ס"מ לשנה, בהתאמה. כתוצאה מכך נוצרות שרשרות הרים רחבות – הרי הזגרוס באיראן והטאורוס בתורכיה וההרים שמצפון להם – אבל נושא זה לא יידון כאן.

מבנה טרנספורם ים המלח

עד כה עסק הדיון באופי הכללי של הטרנספורם ולא התייחס לכך שבמציאות זהו מבנה מסובך, כמו בכל גבולות הלוחות. הוא איננו קו שבירה יחיד ורצוף, אלא רצועה שלאורכה ישנם שברים רבים, אגנים עמוקים וגושים מורמים. מתברר שההבנה שמבנה זה נשלט על ידי הסטה אופקית שמאלית נותנת

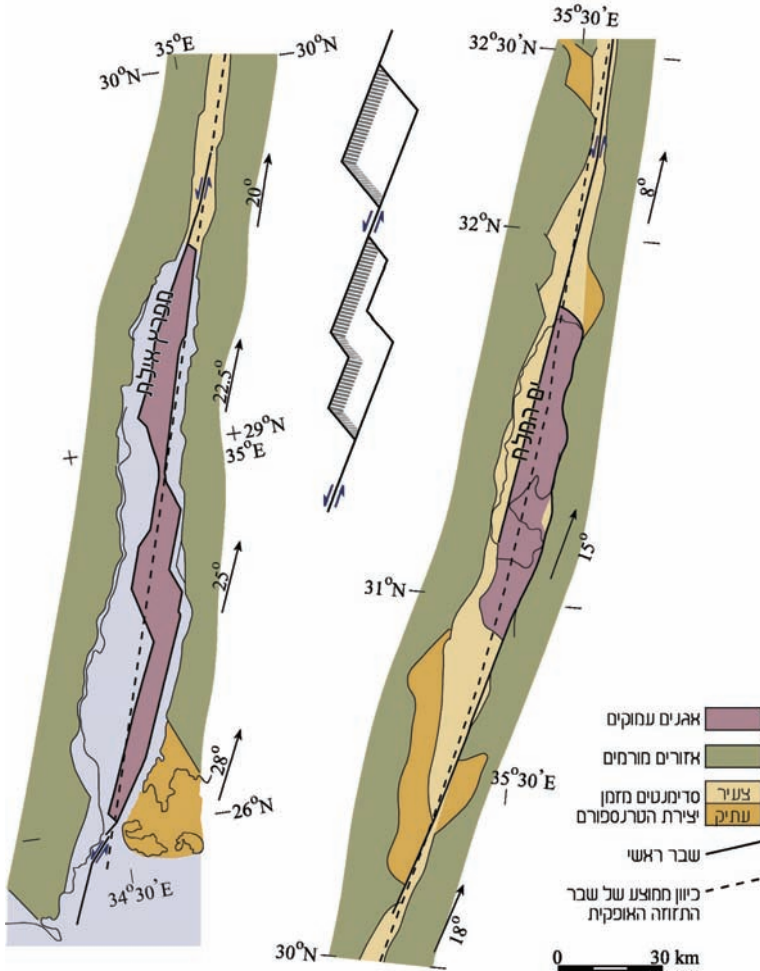
בידינו מסגרת להבנת פרטי המבנה. לנוחות הדיון כדאי להבדיל בין שני קטעים – מדרום למטולה ומצפון לה.

הקטע הדרומי מצוין על ידי עמק ברוחב משתנה – החל בפחות מחמישה קילומטרים (מדרום לבית שאן, במרכז הערבה) ועד 15-20 קילומטר ויותר (ים המלח, מפרץ אילת). עמק זה מוגבל כמעט לכל אורכו על ידי מצוקים שנוצרו על ידי שברים נורמליים, אבל בתוכו ישנם שברים נוספים התוחמים שורה של אגנים (שקעים) עמוקים המופרדים על ידי אוכפים (איור 7). האגנים מצוינים על ידי שקעים טופוגרפיים כמו ים המלח ומפרץ אילת שקרקעיתם מגיעה בערך ל-0.7 ו-1.6 קילומטרים מתחת לפני הים. נתוני קידוחים ושיטות אחרות ללימוד המבנה בתת־קרקע מראים שבאגנים אלה הצטברו סלעי משקע (לפעמים גם סלעים וולקניים) בעובי שעד 10 קילומטרים ויותר בפרק הזמן שבו התרחשה תנועת הלוחות לאורך הטרנספורם, בעוד שבאוכפים המילוי דק מאוד או חסר. אנו לומדים מכך שהאגנים הם שקעים הרבה יותר עמוקים מהביטוי שלהם בנוף ושהם נעשו עמוקים יותר ויותר במשך ההיסטוריה של הטרנספורם, אבל הצטברות המילוי בתוכם לא הייתה מהירה כמו ההשתפלות של קרקעיתם ולכן נשאר שקע טופוגרפי.

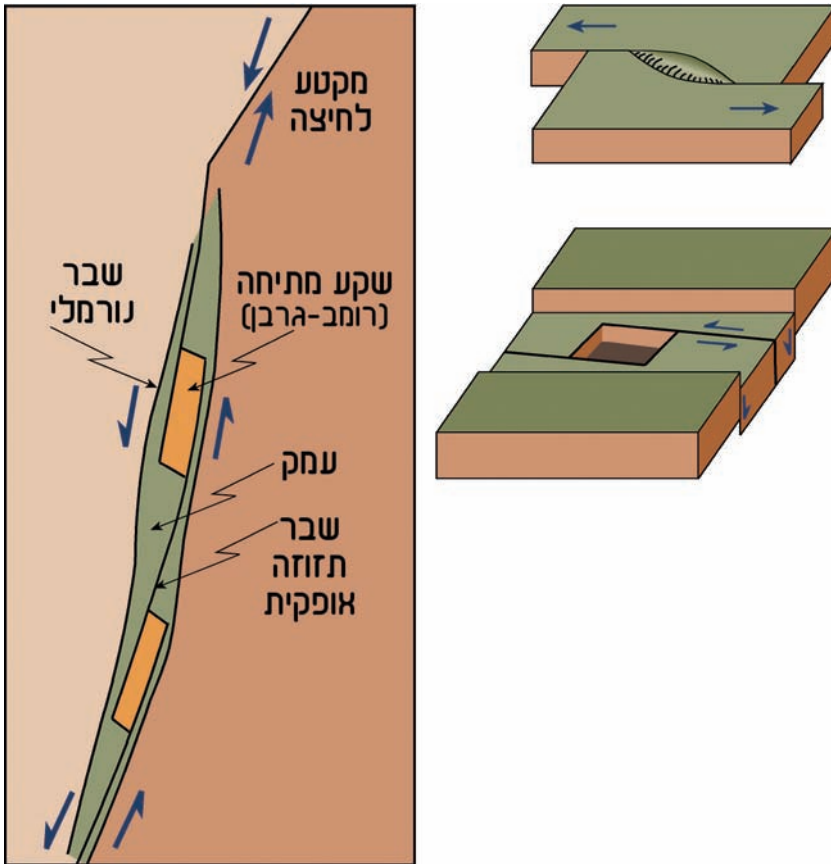
אופייני לשברים המהווים את הגבולות המזרחיים והמערביים של האגנים הוא כיוונם: בזווית קטנה בכיוון השעון ביחס לכיוון הכללי של הטרנספורם. לכן שברים אלה והאגנים שביניהם מסודרים בצורה מדורגת, זאת אומרת שהם נראים כאילו הם 'קופצים' שמאלה לאורך הטרנספורם (איור 8). למשל, שבר בולט לאורך הצד המזרחי של הערבה הצפונית מגיע לדרום־מזרחו של ים המלח ונמשך לאורך צדו המזרחי, אבל איננו נמשך צפונה לתוך עמק הירדן. לעומת זאת, שבר בולט יוצא מצפון־מערבו של ים המלח ונמשך צפונה לאורך מרכז עמק הירדן. קל לראות (איור 8) שהסטה אופקית שמאלית לאורך מערכת שברים מדורגים בצורה כזאת תגרום לכך שבין השברים הבודדים ייווצרו פערים בין הגושים הזזים. במקומות אלה יכולים להיווצר שברים גם בזווית גדולה לטרנספורם, התוחמים את האגנים מצפון ומדרום.

שברים המסודרים בצורה מדורגת וביניהם אגנים מצויים לאורך רוב שברי ההסטה האופקית הגדולים בעולם; האגנים תמיד נוצרו בין שברים המדורגים באותה מגמה כמו המגמה של ההסטה האופקית. לעומת זאת, כאשר השברים מדורגים או כפופים בצורה הפוכה, הגושים שמשני צדי השברים ייתקלו זה

בזה וייווצר מצב של לחיצה (איור 8). מצב כזה יכול לגרום להרמת גושי סלע וליצירת קימוט ושברים הפוכים. יחסי מבנה כאלה נחשבים דיאגנוסטיים לקיום הסטה אופקית ולזיהוי מגמת ההסטה.



איור 7: המבנים העיקריים והאגנים העמוקים הגדולים לאורך טרנספורם ים המלח אפשר לראות שהשברים העיקריים לאורך הטרנספורם מסודרים בצורה מדורגת והם בזווית קטנה לכיוון הממוצע של הטרנספורם. התרשים במרכז מראה באופן סכמטי איך סידור כזה של שברי הסטה גורם ליצירת אגנים המופרדים על ידי אוכפים (ראו איור 8).



איור 8: סוגי המבנים העיקריים לאורך טרנספורם ים המלח מימין: יצירת מבנה לחיצה מורם לאורך כיפוף ימינה של שבר הסטה אופקית שמאלית (למעלה) ויצירת בור עמוק בין שברי הסטה שמאלית המדורגים/כפופים שמאלה (למטה). מבנים אלה נמצאים בתוך אזור נמוך המוגבל על ידי שברים נורמלים המפרידים אותו מאזורי שוליים מורמים.

משמאל: סידור המבנים הללו לאורך טרנספורם ים המלח. בצפון – בלבנון – הטרנספורם כפוף ימינה וזה גורם ללחיצה שמרימה את הרי הלבנון והחרמון, בעוד שדרומה יותר שברי התזוזה האופקית מדורגים שמאלה ושם נוצרו אגנים המופרדים על ידי אוכפים.

הפעילות של מערכת השברים שבתוך האגנים ולאורך הטרינספורם בכלל היא המאפשרת את ההסטה האופקית לאורך הטרינספורם. השברים לאורך הערבה ועמק הירדן, זאת אומרת באוכפים שבין האגנים של מפרץ אילת וים המלח ובין ים המלח לבקעת כנרות והכנרת, הם שברי הסטה אופקית. הם אינם ישרים ממש, וכאשר הם מתכופפים מעט או קופצים יש לאורכם אגנים קטנים או מבני לחיצה (באורך מספר מאות מטרים או קילומטרים ספורים), כמתואר לעיל. כך השבר שנמשך צפונה מים המלח מתכופף מעט ימינה ולאורכו יש מבני קימוט ושבירה הפוכה המוכיחים לחיצה. צפונה יותר בבקעה נלחצו סלעי המשקע כלפי מעלה ויוצרים גבעה בולטת. עם זאת, במקומות שיש בהם כיפופים קלים שמאלה נוצרים אגנים קטנים, כמו בערבה ממזרח לתמנע. כל אלה הם ביטויים מובהקים של שברי הסטה אופקית פעילים. במבט ראשון נראה מפתיע שהביטוי לשברים אלה, שהם החשובים ביותר, חלש בנוף (ולכן עבר זמן עד שחשיבותם הובנה). הסיבה לכך היא שהם חוצים סדימנטים צעירים מאוד, שגילם לכל היותר עשרות עד בערך מאה אלף שנה. לכן על פני השטח אפשר לראות ביטוי רק לתנועה שהתרחשה בפרק זמן זה, ותנועה זו כמובן קטנה. נוסף על כך, הסטה אופקית איננה יוצרת מדרגות בנוף, בניגוד לשברים נורמליים היוצרים מצוקים. ההסטה האופקית מתרחשת גם בתוך האגנים והיא מוכחת על ידי המנגנונים של רעידות האדמה המתרחשות בהם, אבל הביטוי המדויק של התנועה מוסתר על ידי גופי המים באגנים האלה.

המבנים הללו, המבטאים במישרין את ההסטה האופקית, מצויים כאמור בתוך עמק המוגבל בשברים נורמליים (איורים 7, 8). פעולתם של שברים נורמליים גורמת לתנועות אנכיות היוצרות מצוקים וגם מתיחה בניצב להם (איור 3). לפיכך מציאותם לאורך הטרינספורם שמדרום למטולה מראה שכאן שולי הלוחות קצת נפרדים זה מזה, כך שהתנועה בין הלוחות היא קצת בזווית לכיוון הכללי של הטרינספורם.

מידת ההיפרדות משתנה לאורך הטרינספורם. במקומות שבהם האגנים רחבים היא מגיעה עד 5%-10% מהתנועה האופקית. בסך הכול זהו מרכיב משני של התנועה לאורך גבול הלוחות, אבל מרכיב זה חשוב מאוד, כי הוא הגורם ליצירת העמק הטופוגרפי והאגנים העמוקים המאפיינים את טרינספורם ים המלח מדרום למטולה.

הקטע הצפוני של טרינספורם ים המלח שונה מהקטע הדרומי בכך שאין

לאורכו עמק רצוף. שבר ההסטה האופקית העיקרי נמשך מצדו המערבי של עמק החולה כלפי צפון לאורך הצד המזרחי של הרי הלבנון. מה שבולט הוא שכיוונו משתנה והוא כפוף ימינה עד כדי 30 מעלות בהשוואה לכיוון השברים מדרום למטולה. לפי האמור לעיל (איור 8) הסטה שמאלית לאורך כיפוף כזה צפויה לגרום ללחיצה חזקה. זאת נחשבת הסיבה להתרוממות הצעירה של הרי החרמון-מול הלבנון והרי הלבנון, שהם מבני קימוט גדולים הגבוהים ב-1.5-2.0 קילומטרים יותר מהאזורים הסמוכים לאורך הטרנספורם. מצפון ללבנון שברי הטרנספורם הם שוב בעלי כיוון קרוב לצפון-דרום ושם שוב חוזר המבנה של אגנים ואוכפים.

התיאור הזה מראה שההבנה כי הסטה אופקית גדולה התרחשה לאורך הטרנספורם מאפשרת להסביר בצורה פשוטה את פרטי המבנה לאורכו. זוהי תמיכה נוספת ובלתי צפויה לתאוריה, מפני שהשיקולים שהביאו להבנת חשיבותה של ההסטה האופקית לא התייחסו כלל לפרטי המבנה. שוב, היכולת להסביר תופעות שמלכתחילה לא הובאו בחשבון או שלא היו ידועות היא מבחן נוסף שהתאוריה עומדת בו בהצלחה. זה גם מאפשר לשכלל ולפתח את ההסבר הכללי, למשל על ידי זיהוי קיומם של מרכיבי מתיחה או לחיצה משניים לאורך קטעים שונים של הטרנספורם. אך נשאר עדיין האתגר להכיר את פרטי המבנה ולהבין אותם בצורה כמותית, ובמיוחד להבין כיצד הם נמשכים בעומק.

חשוב להדגיש גם שהמבנה של טרנספורם ים המלח שונה מאוד מהמבנה של בקעים של מתיחה. קו הדמיון היחיד – שבלט מאוד לחוקרים הראשונים – הוא קיומו של שקע טופוגרפי משני צדדיו מצוקים שנוצרים על ידי שברים נורמליים מקבילים לשקע, האופייניים לבקעים של מתיחה. אבל בקעים כאלה רחבים יותר במידה משמעותית מהשקע שלאורך הטרנספורם, והמבנה הפנימי שלהם מאופיין על ידי גושים נטויים לצד זה או אחר של הבקע אשר מוגבלים על ידי שברים נורמליים – מבנה שאינו קיים לאורך הטרנספורם. מנגד, לאורכם של בקעים של מתיחה אין שברים, אגנים ואוכפים המסודרים בצורה מדורגת, וכמובן אין לאורכם שברי הסטה אופקית והופעה לסירוגין של מבני מתיחה ולחיצה משניים. אלה אופייניים לקווי שבירה הנשלטים על ידי הסטה אופקית, כמו למשל שבר סן-אנדריאס בקליפורניה והשבר הצפון-אנטולי בתורכיה.

דברי סיום

המאמר הציג את מערכת השיקולים העיקריים שהיא הבסיס להבנת טרנספורם (בקע) ים המלח. הדיון התמקד בראש ובראשונה בנושא העקרוני ביותר – הקביעה שלאורך מבנה זה התרחשה הסטה שמאלית של כ-105 קילומטר. ראינו את התצפיות והשיקולים העיקריים המובילים למסקנה זו וכיצד הפירוש הזה עמד במבחנים שונים כנדרש מכל פירוש מדעי קביל. ראינו ששתי קבוצות נתונים בלתי תלויות – תפוצת גופי סלע ומבנים לאורך הטרנספורם ושיקולים של התנועה בין לוחות ערב ונוביה – מובילות לאותה מסקנה. הדיון לא התייחס לעובדה שבמציאות מדובר כאן ברצועת שברים ברוחב של עד כמה עשרות קילומטרים, אלא התבסס רק על נתונים הנוגעים ליחסים גאולוגיים שמחוץ לטרנספורם, והנה מתברר שהתוצאה שלו מציגה מסגרת להבנת פרטי המבנה לאורך הטרנספורם.

תצפיות אלה, למרות חשיבותן, הן רק צעדים ראשונים במחקר הטרנספורם. עדיין אין מספיק ידע על המבנה העמוק של האגנים והשברים, על פרטי ההיסטוריה שלהם וכיצד הם השתנו במשך הזמן. הקטע הצפוני של הטרנספורם מוכר מעט. כל האמור לעיל מתייחס רק לתיאור התופעות, אבל הבנה מעמיקה מחייבת לפענח גם את אופיים של הכוחות הגאולוגיים שגרמו לשבירת הלוחות באזורנו ומניעים אותם, ואת התהליכים השולטים ביצירת השברים הבודדים והמבנים האחרים לאורך הטרנספורם ובתנועה. חשוב גם להדגיש שהיצירה של הטרנספורם (ומבני הביקוע האחרים באזורנו) והתפתחותם היו מלווים בפעילות וולקנית ובהתרוממות רבה באזורים המשתרעים עד למרחק כמה מאות קילומטר ממנו. הרחבת הידע וההבנה של מכלול הנושאים הללו הן אתגר למחקר עתידי שיפענח באופן מעמיק את התהליכים הגאולוגיים שיצרו את טרנספורם (בקע) ים המלח ועיצבו אותו.