

הגיאולוגיה של בקע ים-המלח (בקע הירדן)

צבי גרמנקל

המחלקה לגיאולוגיה האוניברסיטה העברית

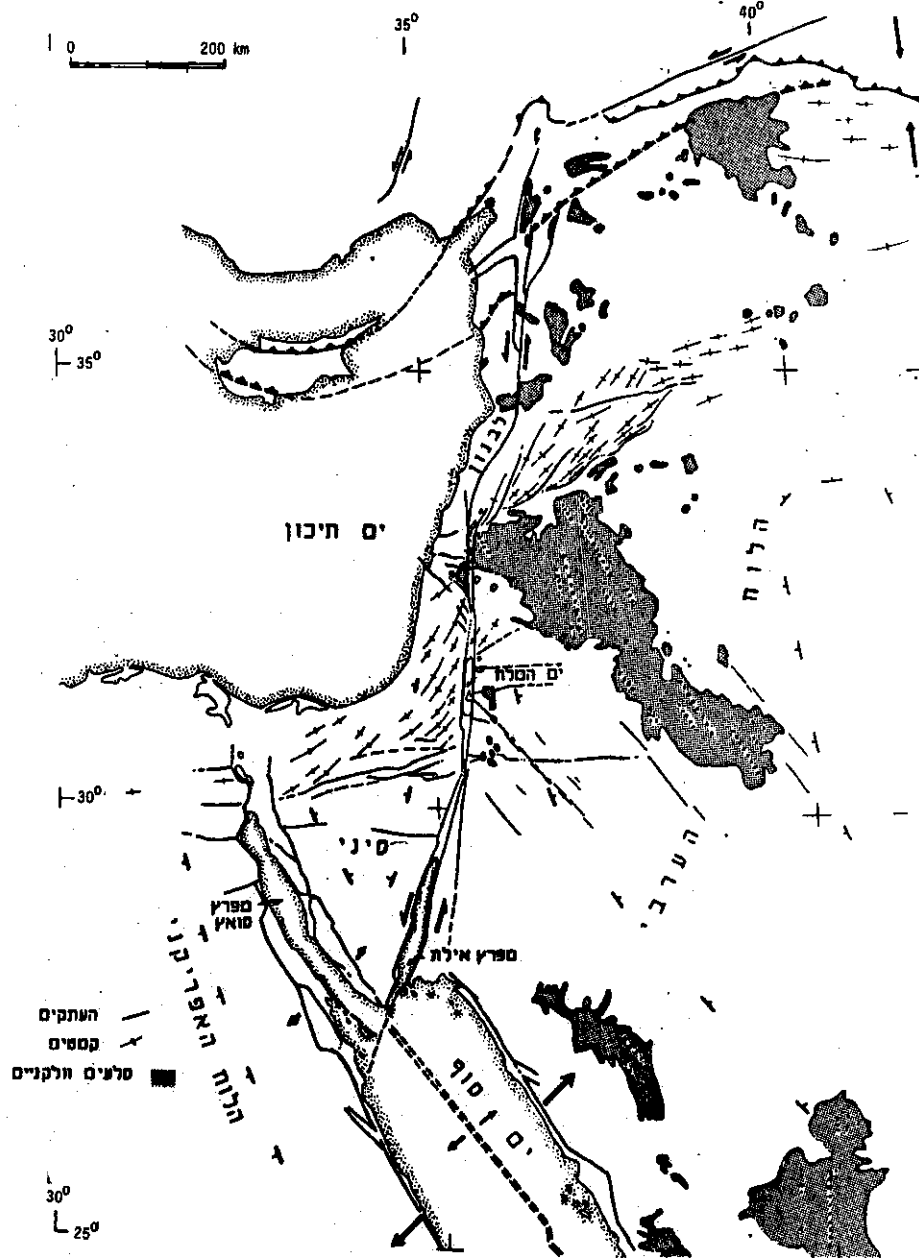
הקדמה

כל מי שחקר את הגיאולוגיה של ארץ ישראל וסביבותיה התרשם מבקע ים המלח (ציור 1.1). זהו פס שבירה צר באורך יותר מ-1000 ק"מ, אשר נמשך מים-סוף בדרום ועד להרי הטאורוס בצפון, ואשר רובו מצוין על ידי שקעים טופוגרפיים צרים ועמוקים. שברים גדולים מצויים הן בשולי השקעים הללו והן על קרקעיתם. בתוך השקעים עצמם הצטברו סדימנטים צעירים בעובי קילומטרים אחדים. מקובל לקרוא לתופעה "בקע" אם כי בלשון המקצועית נכון יותר להשתמש כאן במונח טרנספורם (כפי שיוסבר להלן). כבר במאה שעברה הוכר שמדובר כאן בצלקת גדולה שנוצרה ע"י שבירה של קרום כדור הארץ, ובראשית המאה הנוכחית הוכר שבקע (טרנספורם) ים המלח הוא בעצם חלק ממערכת שבירה עוד יותר גדולה - השברים הסורו-אפריקניים (ציור 1.2) - שנמשכת לאורך כ-6000 ק"מ עד למזרח אפריקה בדרום. מערכת זו כוללת גם את הבקעים של מפרץ סואץ, ים-סוף ומפרץ עדן. כיום מקובל שהמערכת הזו היא דוגמה לשבירת יבשות צעירה, ושהבקעים מציגים גבולות צעירים של לוחות ליטוספריים⁽¹⁾⁽²⁾. זוהי דוגמה מרשימה לאחד התהליכים החשובים בפני כדור הארץ - שבירת יבשות.

המטרה של רשימה זו היא לסקור מספר תכונות יסוד גיאולוגיות של בקע (טרנספורם) ים-המלח. כיוון שהבקע הנו חלק מתופעה גדולה בהרבה, הדיון יהיה בשני מישורים: תחילה נתייחס לתופעה הגדולה ונסתכל על בקע ים-המלח כחלק מתופעה גדולה וכביטוי לתהליך שבירת יבשות; בדרך זו יודגשו הצדדים העקרוניים של התופעה ואפשר יהיה להסתכל על בקע ים-המלח בפרספקטיבה של תהליכים גלובליים. אח"כ נשוב ונתמקד בפרטים המקומיים. בקע ים המלח נחקר על"י אנשים רבים, כך שכיום הצטבר ידע רב אודות היבטים שונים של הגיאולוגיה שלו ושל האיזורים הסובבים אותו. אין כוונה לסקור כאן את כל הידוע, אלא רק לדון במספר בעיות עקרוניות.

רקע גיאולוגי

האיזור החצוי על ידי טרנספורם ים-המלח, וע"י מערכת הבקעים הסורו-אפריקנית בכלל, היה חלק מיבשת יציבה - פלספורמה⁽³⁾ - מאז תחילת הקמבריום (לפני כ-550 מליון שנה). האיזור מרופד על ידי תשתית פרה-קמברית שבנויה בעיקר מסלעים מאגמטיים (בעיקר גרניטים) וסלעים מטמורפיים. התשתית עוצבה בתהליך רב ארועים שהסתיים עם תחילת הקמבריום, ומאז, במשך כ-500 מליון שנה היה הקרום של האיזור



ציור 1: יחידות המבנה העיקריות בישראל וסביבותיה. החיצים העבים מראים כווני תנועה יחסית בין לוחות. בקע (טרנספורם) ים המלח מתואר בצורה סכמטית. יש לשים לב לכפוף השבר הזה בהרי הלבנון. כמו כן יש לשים לב שקווי השבירה של הנגב המרכזי ומרכז סיני מוסטים ע"י טרנספורם ים-המלח (המשכם מזרחה הוא ממזרח לים המלח ולערבה הצפונית).

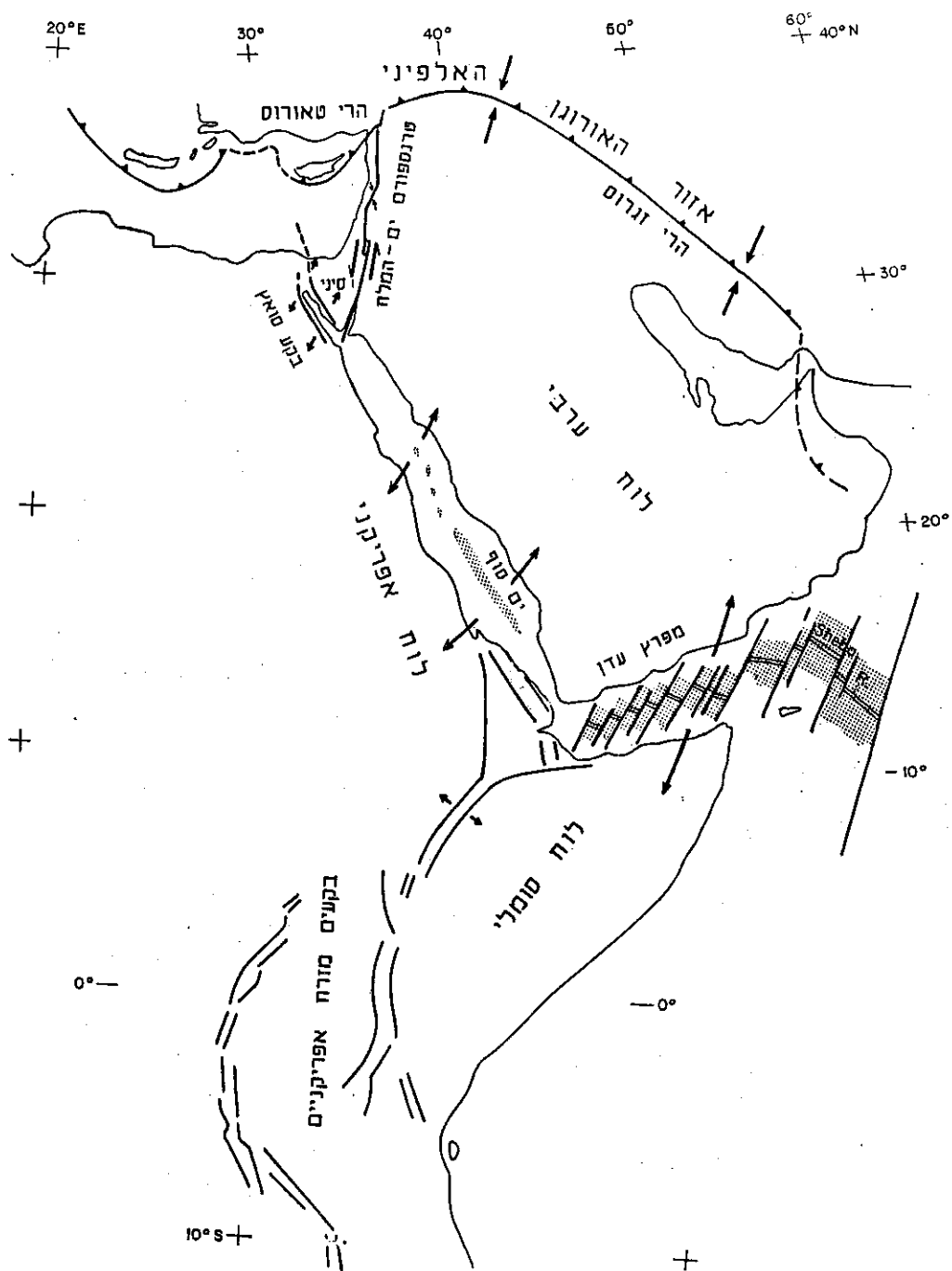
יציב ונפגע רק מעט על ידי דפורמציה גיאולוגית ועל ידי תהליכים מאגמטיים. תהליך שכירת האיזור ויצירת הבקע הסורו-אפריקניים, החל לפני כ-30-40 מליון שנה בלבד. במשך התקופה הארוכה שבה האיזור היה יציב, ערב ואפריקה היו איזור יבשתי רציף בעל נוף שטוח בד"כ, אשר עליו הצטברו סלעי משקע (בעובי עד 5 ק"מ). סלעים אלה הורבדו בסביבה יבשתית (אגמים, משטחי שטפון של נהרות וכיו"ב) טור סלעים זה מהווה את "הכסוי הסדימנטרי" של הפלטפורמה. בד"כ השכוב של סלעים אלה הוא פחות או יותר אפקי, דבר המבטא את מעוט הדפורמציה הגיאולוגית באיזור במשך הצטברות הכסוי הסדימנטרי. רק בשטחים קטנים יחסית (למשל מרכז ישראל ורוכ הנגב, מרכז סוריה) הסדימנטים מקומטים, אך זהו קימוט חלק למדי. האיזור שאנו דנים בו, דהיינו צפון-מזרח אפריקה וערב, היה במשך הפליאוזואיקון חלק מיבשת גונדוונה-לנד העצומה. מתחילת המזוזואיקון⁵ יבשת זו התפרקה לחלקים רבים (הודו, אוסטרליה, אנטארקטיקה, דרום אמריקה, אפריקה ועוד) כתוצאה ממספר מאורעות של כיקוע יבשות. באחד מן השלבים המוקדמים של תהליך זה (בטריאס וביותר מוקדם, לפני 240-200 מליון שנה) נוצרו שולי היבשת בים-התיכון המזרחי הוך נתוק גושים יבשתיים מחלק זה של גונדוונה-לנד. מאורע זה פגע במדת מה גם באזור שחצוי כיום ע"י חלקו הצפוני של בקע (טרנספורם) ים המלח, אך כמעט ולא הורגש דרומה יותר (מאורע דומה יצר שולי יבשת גם לאורך הרי הזגרוס). יצירת הבקעים הסורו-אפריקניים מציינת את השלב הצעיר ביותר של התפרקות גונדוונה-לנד.

כידוע החלק החיצוני של כדור הארץ בנוי מסלעים קרים וקשים היוצרים שכבה קשיחה - הליתוספירה¹ - אשר מחולקת למספר גושים - לוחות. הלוחות נעים זה ביחס לזה הוך כדי שהם מחליקים על גבי השכבות החמות והרכות אשר מתחת לליתוספירה. עיקר הפעילות הגיאולוגית מתרחשת לאורך הגבולות בין הלוחות. כוון התנועה של לוחות שכנים זה ביחס לזה, ומהירות התנועה קובעים את המכנה לאורך הגבול שביניהם. התנהגות הלוחות והאינטראקציה ביניהם שולטים על ההיסטוריה של פני כדור הארץ. במסגרת תורת הלוחות הליתוספריים האיזור שאנו דנים בו היה חלק מלוח גדול במשך 500 מליון השנים בהן היה יציב. בעקבות מאורע בקוע היבשות של המזוזואיקון המוקדם נוצרו שטחים בעלי קרום אוקיאני או דמוי-אוקיאני לאורך שולי היבשת החדשים, אך הם היו חלק מאותו הלוח - הלוח הערבו-אפריקני - שכלל את האיזור היבשתי שאנו דנים בו. כיון שהם כולח נעו במקשה אחת. מאז הקרטיקון התיכון הלוח הזה נע צפונה ביחס לאירואסיה, ולכן גבולו הצפוני התנגש עם הלוח האירואסי או עם לוחות קטנים שהתקיימו בין שני הלוחות הגדולים. באיזור ההתנגשות נוצרו הרי הזגרוס והרי הטאורוס (וגם נכלעו שטחים אוקיאניים בשולי הלוח הערבו-אפריקני). שרשרת הרים אלה הן חלק מן האורוגן⁴ האלפיני-הימלי. תהליך בקוע היבשות הצעיר שיצר את הבקעים הסורו-אפריקניים התרחש כאשר תהליך התנגשות הלוחות לאורך השרשרת האורוגנית האלפינו-הימלית היה בעיצומו. מנקודת

המבט של תורת הלוחות הליתוספריים תהליך הביקוע פירושו התפרקות הלוח הערכו-אפריקני הגדול ללוחות קטנים יותר שמתרחקים זה מזה, וכל אחד מהם נע בצורה שונה ממשנהו. הבקעים הסורו-אפריקניים הם הגבולות החדשים שבין שכרי הלוח הערכו-אפריקני המקורי (ציור 1.2).

טרנספורם ים-המלח - תוצאה של ביקוע יבשות

ביקוע יבשות מתרחש כתוצאה של תהליכים שונים בפנים כדור הארץ מתחת לליתוספירה, ז.א. באיזורים סמויים מעינינו. לכן פרטי המאורעות בעומק לא תמיד ברורים, אבל לתהליך ביקוע היבשות מספר תוצאות אפיניות בפני השטח: פעילות וולקנית, התרוממות טופוגרפית של האיזור המתבקע, וכמובן יצירת שכרים החוצים את הליתוספירה ובד"כ גורמים לכך שעל פני השטח יוצרו שקעים מארכים אשר מוגבלים על ידי שכרים שנקראים עמקי ביקוע או בקעים. ההתרוממות והוולקניזם מתרחשים בעצמות שונות על פני שטחים שנמשכים למרחק של מאות ק"מ מצדי הבקעים. בדרך כלל הפעילות הוולקנית מקדימה את היצירת הבקעים. פעילות זו אפנה קשורה תמיד במישרין לבקעים, אם כי בבקעים מסוימים יש יותר פעילות וולקנית מאשר מחוץ להם. הוולקניזם מעיד על כך שבמעטפת אשר מתחת לבקעים, מתרחש תהליך של רכוז חום. מקובל לחשוב שתהליך זה הוא בעיקרו זרימת חום ועמוק כלפי מעלה. גם ההתרוממות הטופוגרפית מבטאת חמום של הליתוספירה, אבל זהו תהליך שלוקח זמן רב, כי הולכת חום דרך סלעי הליתוספירה היא איטית מאד. ההתרוממות המירבית היא לאורך הבקעים עצמם - ז.א. נראה כאילו הם חוצים את השיאים של תפוחות מארכות של הליתוספירה. רוב ההתרוממות של שולי הבקעים מתרחשת תוך כדי התפתחות הבקעים והשתפלות עמקי הביקוע, אם כי נראה שההתרוממות מתחילה זמן מה לפני שהשכירה יוצרת עמקים בולטים. כל התופעות האלה נכרות היטב לאורך הבקעים הסורו-אפריקניים, ובפרט לאורך הענפים הצפוניים של המערכת. בדיקת מפה טופוגרפית של ישראל ושל סביבותיה מראה שטרנספורם ים המלח, מפרץ סואץ וים-סוף חוצים איזור גבוה טופוגרפית. באיזור זה סלעים ימיים מגיל איאוקן (בערך 45 מליון שנה) ומגיל מיוקן תיכון (בערך 15 מליון שנה) מצויים בגבה של 1-1.5 ק"מ ובערך 0.5 ק"מ בהתאמה מעל פני הים, דבר המוכיח שההתרוממות של האיזור היא צעירה מבחינה גיאולוגית. האיזורים שהתרוממו נפגעו בחלקם על ידי אירוזיה. האירוזיה היתה חזקה במיוחד סמוך לבקעים עצמם ושם נוצר נוף מאד מבותר. כך נוצרו, בין השאר, ההרים בנגב, בסיני, בעבר הירדן ודרומי יותר משני צדי ים-סוף. במקומות שהאירוזיה היתה חלשה נשאר נוף של רמות (למשל ממזרח להרי אדום). כל השטח שמצפון לקו רחב 20 צפון היו מכוסים לפני הביקוע בסלעי משקע מגילים שונים, עד וכולל איאוקן. האירוזיה הצעירה, כתגובה להתרוממות, היא שחשפה ובתרה את סלעי התשתית הפרה-קמברית על פני שטחים נרחבים. למעשה, מציאות סלעים פרה-קמבריים בגבה 1-2.5 ק"מ מעל פני הים היא אחת התופעות המיוחדות של



ציור 2: מערכת הבקעים הסורית-אפריקנית. החצים העבים מראים את כוון התנועה היחסית של הלוחות. שטח מנוקד - יחידת שטח בעל קרום אוקיאני צעיר.

איזורנו. זו תופעה חריגה בעולם - בד"כ מחשופי הסלעים הפרה-קמבריים בעולם (השילדים) יוצרים נוף מישורי גבעי קרוב לפני הים. הוולקניזם הקשור לביקוע התרחש במקומות רבים וכתוצאה מכך נוצרו מחדרים רבים וגם נבנו מספר שדות וולקניים, בעיקר ממזרח לים סוף ולטרנספורם ים-המלח (ציור 1.1). השדה הגדול ביותר הוא של ואדי סרחן - ג'בל דרוז, ואורכו כ-300 ק"מ. הסלעים הוולקניים של רמת הגולן ושל הגליל המזרחי מהווים את קצהו הצפון-מערבי של שדה זה. בישראל ובסביבותיה התופעה של הוולקניזם היא איזורית, ורק מעט מן הוולקניזם קשור במישורין לבקעים. כמו התרוממות, גם הוולקניזם מבטא תהליכים שפעלו בעומק מתחת לאיזור רחב, ואשר גרמו להתפרקות החלק הצפון-מזרחי של יבשת ערב-אפריקה. הבקעים עצמם, ז.א. הסדקים בליתוספירה, נוצרו במרכזו של איזור זה.

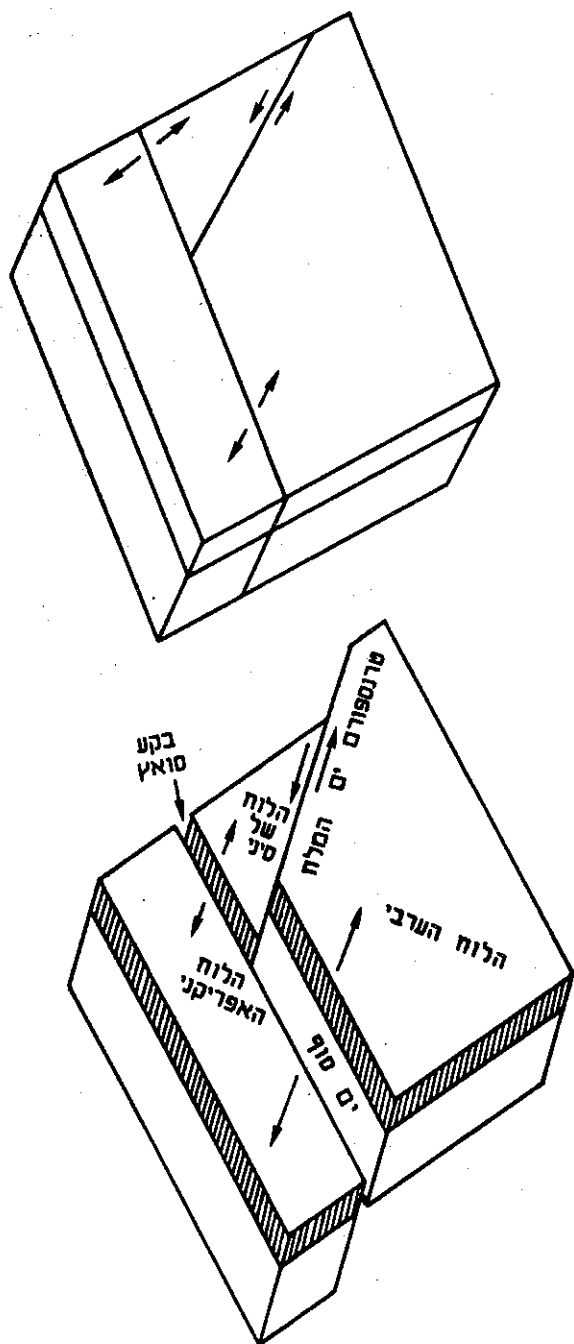
הבקעים הם, אם כן, סדקים אשר חוצים את כל עובי הליתוספירה של הלוח הערבי-אפריקני המקורי. בדרך כלל שברי לוח מתבקע מתרחקים זה מזה, וזה קרה גם באיזורנו (ציור 1.2). כך, סיני התרחקה (ועדין מתרחקת) מאפריקה בכדי 10-30 ק"מ, וביניהם נוצר בקע מפרץ סואץ. גם קרן אפריקה - הלוח של סומלי - התרחקה במידה דומה משאר אפריקה, כשביניהם נוצרו הבקעים של מזרח אפריקה. בכל הבקעים הללו הקרום היבשתי נשבר ונמתח וגם נחדר ע"י מאגמות, אך רציפותו עדין לא נפגמה, ז.א. כל רחב הבקעים הללו מרופד בחמר הקרום של יבשת ערב-אפריקה. מתיחה מקבילה התרחשה, כמובן, גם בחלקים העמוקים יותר של הליתוספירה. לעומת זאת, הלוח הערבי התרחק הרבה יותר - בכדי מספר מאות קילומטרים מן הלוח האפריקני ומן הלוח של סומלי: לכן לאורך ים-סוף ומפרץ עדן (גבולות לוחות ערב-אפריקה וערב-סומלי בהתאמה) הקרום היבשתי נקרע ונוצר קרום אוקיאני שבנוי מחמר שעלה ממעמקים ומלא את הרווח בין הלוחות המתרחקים. ים סוף ומפרץ עדן הם למעשה אוקיאנוסים בשלבי ההווצרות הראשונים (גם האוקיאנוס האטלנטי, למשל, החל להווצר באופן כזה!). לא ברור אם הבקעים של מפרץ סואץ ומזרח אפריקה יגיעו אי פעם לדרגה כזו של פתיחה. בעבר הגיאולוגי נוצרו הרבה בקעים שהפסיקו לפעול ולא גדלו לאוקיאנוסים, זאת אומרת ההתרחקות בין שברי הלוחות שמשני צדיהם נפסקה. רק מיעוטם של הבקעים מצליח להתפתח לאוקיאנוסים. ז.א. רק במעט מקרים ממשיכים שברי הלוחות להתרחק זה מזה למרחקים גדולים. במובן זה כל שאר הבקעים שמפסיקים לפעול הם "בקעים שנכשלו" בנסיון ליצור אוקיאנוס חדש.

כאן המקום לשאול מה היתה תנועת הלוחות שמני צדי בקע (טרנספורם) ים-המלח? במלים אחרות - מה היתה התנועה בין הלוח הערבי ללוח של סיני וישראל? התשובה לשאלות אלה יכולה להנתן משתי נקודות מבט: מתוך תצפיות ישירות על בקע (טרנספורם) ים-המלח עצמו, ומתוך תצפיות על כלל תנועת הלוחות באיזור. שתי הגישות משלימות זו את זו ומביאות למסקנות דומות. נאמץ תחילה את הגישה השנייה.

נקודת המוצא במקרה זה היא ההכרה שהתנועה של הלוחות משני צדי בקע (טרנספורם) ים-המלח מבטאת את התנועה של הלוח של ערב ביחס ללוחות הסובבים אותו. לכן נתן לחשב את התנועה בין סיני לערב מתוך התנועות על גבולות הלוחות האחרים. לא נכנס לפרטים, אך מספיק לציין שתוצאות החשבון מראות כמה דברים יסודיים: ראשית, כוון התנועה בין ערב לאפריקה ז.א. כוון התנועה של ערב ביחס לאפריקה, הוא בכוון צפון-צפון-מזרח. כוון זה הוא בזווית לציר האורך של חלק זה של ים סוף, אך כמעט מקביל לבקע (טרנספורם) ים-המלח. פרושו של דבר שערב מחליקה צפונה לאורך בקע (טרנספורם) ים-המלח (ציור 1.3). בעוד שבים סוף ישנה פתיחה והלוחות שמשני צדיו מתרחקים זה מזה, הרי על בקע (טרנספורם) ים-המלח, שכוונו שונה מכוון ים סוף, התנועה היא של החלקה הצדה ולא של פתיחה. תכונה זו מבדילה את בקע (טרנספורם) ים-המלח מן הענפים האחרים של מערכת הבקעים הסורו-אפריקניים. גבול לוחות כזה נקרא טרנספורם, ומכאן השם "טרנספורם" ים-המלח. סדק זה בליתוספירה איננו, אם כן, בקע רגיל. מסקנה שניה הנובעת מנתוח תנועת הלוחות האזורית היא שבצפון ים סוף הלוח הערבי התרחק מן הלוח האפריקני בכדי 140 ק"מ. חלק מתנועה זו - כ-20-30 ק"מ, נספג ע"י התרחקות סיני מאפריקה ופתיחת מפרץ סואץ, ואילו רוב התנועה, 100-110 ק"מ, עברה לטרנספורם ים-המלח (ציורים 1.2, 1.3). נתוח זה מראה שיש קשר ישיר בין ההיסטוריה של פתיחת ים סוף (ומפרץ עדן) לבין ההיסטוריה של טרנספורם ים-המלח. חשוב מאד להדגיש שמסקנות אלה מתבססות על נתונים אודות איזורים שמחוץ לטרנספורם ים-המלח ועל הכללים של תנועת הלוחות. זה מראה את הכח של תורה זו וגם מראה שכדי להבין את טרנספורם ים-המלח צריך להתחשב בנתונים מאיזורים סמוכים, כי צריכה להיות ביניהם התאמה במסגרת הכללים של תורת הלוחות.

טרנספורם ים-המלח: עדויות מקומיות לתנועה לאורך

נפנה עתה לנתונים המקומיים אודות טרנספורם ים-המלח. כפי שצויין לעיל, לרוב אורכו ישנם שקעים טופוגרפיים-סטרוקטורליים שמוגבלים בצדיהם ע"י שברים. שקעים אלה עמוקים מאד בהשוואה לרחבם. תכונה אפיינית היא שלא מדובר בשקע טופוגרפי אחיד, אלא במערכת אגנים ברחב שונה שמופרדים על ידי ספים. כך, מפרץ אילת בנוי מספר אגנים תת-ימיים. צפונה יותר הערבה מתרוממת, אך משתפלת שוב לכוון ים-המלח. גם בין ים-המלח לכנרת ובין הכנרת לעמק החולה ישנם ספים טופוגרפיים. בולטת גם העובדה שלא תמיד מדובר פה בספים בקרקעית שקע, כמו במפרץ אילת, אלא לאורך קטעים מסוימים של טרנספורם ים-המלח אין בכלל שקעים שמוגבלים משני צדיהם על ידי שברים, אלא יש שבר עיקרי בודד - למשל בערבה המרכזית. תופעה חשובה אחרת היא שבערבה ובעמק הירדן הדרומי ישנם שברים לא רק בשולי השקעים אלא יש גם שברים בולטים לאורך קרקעית העמקים.



ציור 1.3: דיאגרמה המדגימה את תנועת הלוח הערבי ביחס ללוח האפריקני, והיחס של תנועה זו לפתיחת ים סוף ולתנועה לאורך טרנספורם ים-המלח. למעלה - מצב התחלתי. למטה - המצב כיום.

בלבנון אופי הטרנספורם משתנה לחלוטין. לאורך שולי בקעת הלבנון נמשך שבר אחר גדול - שבר ימונה. שבר זה נמשך מעמק החולה ועד לשורת עמקים נוספת בצפון-מערב סוריה. בקעת הלבנון שממזרח לשבר ימונה היא אמנם עמק, אך היא נוצרה ע"י קימוט ולא על ידי שבירה, ומצדה המזרחי אין הבקעה מוגבלת בשברים. תכונות אלה מבדילות את טרנספורם ים-המלח מבקעים כמו מפרץ סואץ שנוצרו ע"י התרחקות שני צדיהם. בקעים כאלה הם בד"כ בעלי רחב של 30-60 ק"מ. ויותר (לעומת מכסימום של 15-20 ק"מ רחב השקעים לאורך טרנספורם ים-המלח). בקרקעיות בקעים רגילים יש הרבה שברים נורמלים שיוצרים מבנה בלוקים - תופעה שכמעט ונעדרת מן השקעים שלאורך טרנספורם ים-המלח. גם הקטעים שבהם יש עמק שמוגבל בשברים רק מצדו האחד, וקטע הרי הלבנון שונים לחלוטין מכל מה שמוכר לאורך בקעים רגילים. הסבה להבדלים האלה היא שכאן מדובר בטרנספורם ולא בבקע רגיל ששוליו מתרחקים זה מזה. כפי שראינו, מסקנה זו נובעת מניתוח תנועת הלוחות. מענין לציון שכבר לפני כחמישים שנה ויותר הוכר הקשר שבין פתיחת ים סוף לתנועה לאורך טרנספורם ים-המלח ע"י דוברטרה (Duvertret) - גיאולוג צרפתי שעבד בעיקר בלבנון ובסוריה. אולם באותה תקופה שיקולים כאלה לא היו מקובלים, ולכן הצעתו לא זכתה לשום הד. אולם כבר באותה תקופה החלו להשמע טעונים לטובת פרוש כזה שהסתמכו על כוון מחקר שונה לגמרי: השוואת הגיאולוגיה של האיזורים שמשני צדי טרנספורם ים-המלח.

התצפית היסודית בנושא זה היא שטורי הסלעים בנקודות סמוכות משני צדי הטרנספורם שונים זה מזה בצורה משמעותית. במיוחד בולטים ההבדלים באיזור שמדרום ללבנון. באיזור זה כל יחידות הסלע של הכיסוי הסדימנטרי של הפלטפורמה הערבו-אפריקנית שמצויות זו מול זו משני צדי הטרנספורם נבדלות בעובי ובהרכב, ובדרום, מחשופי סלעי התשתית הפרה-קמברית שמני צדי הטרנספורם גם כן נבדלים זה מזה. כך תקופות רבות שמיוצגות ממערב לטרנספורם ע"י יחידות סלע שבניות בעיקר אבני גיר ימיות, מיוצגות ממזרח לטרנספורם ע"י יחידות דקות יותר, עשירות באבני חול אשר בחלקן הן יבשתיות. בתקופת הקרטיקון המוקדם התרחשה בישראל ובסביבותיה אירועיה חזקה שגדעה את הכסוי הסדימנטרי במדות שונות. עומק הגידוע שונה מאד משני צדי הטרנספורם. באיזור אילת סלעי התשתית הפרה-קמברית כוללים הרבה סלעים מטמורפיים, וכוון המבנה בד"כ מזרח-מערב; מולם, באיזור עקבה, אין סלעים מטמורפיים בכלל. גם המבנה שמשני צדי הטרנספורם שונה. כך, לקו חמד וקו פארן, שכוונם מזרח-מערב, אין המשך ממזרח לטרנספורם, ולקו שבירה בולט כמו של זרקא-מעין שממזרח לים-המלח אין המשך ממערב לו. קיום הבדלים אלה הוכר כבר מזמן - לפני כ-50 שנה ויותר - ולמרות הידע המוגבל שהיה אז הראה וולינגס (Wellings) שההבדלים נעלמים אם מסיטים את ישראל צפונה ביחס לעבר הירדן. הנושא נבחן מחדש ע"י קנל (Quennell, 1959) - גיאולוג בריטי שעבד בירדן - על סמך נתונים

רבים יותר. הוא שם לב לכך שטרנספורם ים המלח נבדל מבקעים רגילים, כפי שפורט לעיל, וגם הראה שהסטה של ישראל צפונה בכדי 105 ק"מ ביחס לירדן מביאה לכך שטורי סלעים דומים יועמדו זה מול זה משני צדי הטרנספורם. הוא גם הראה שהסטה כזו מביאה זה מול זה מבנים דומים משני צדי הטרנספורם (ציור 1.3, 1.1). רעיון זה נבחן אח"כ ע"י רפי פרוינד (Freund, 1965) וע"י פרוינד וחבריו (Freund et al., 1969) על סמך נתונים רבים יותר. הנתונים החדשים אישרו שוב את תצפיותיו ופרושו של קנל.

הפרש הגיאולוגי של תצפיות אלה הוא שהן מעידות שהתנועה לאורך "בקע" ים-המלח היתה מקבילה לו, וגדלה בערך 105 ק"מ. מלכתחילה (עד גיל קרטיקון מאוחר לפחות) היו כל גופי הסלע משני צדיו דומים. מאוחר יותר הגוש שבמזרח זו צפונה בכדי 105 ק"מ ביחס לישראל (לכן כדי לחזור למצב המקורי צריך להחזיר את ישראל וסיני במרחק כזה צפונה ביחס לירדן). צופה העומד בצד אחד של הטרנספורם רואה, לכן, את צדו השני זו שמאלה. תנועה לטרלית כזו נקראת שמאלית. זו מסקנה בסיסית אודות אופי "בקע" ים-המלח, ומצדיקה את ההתייחסות אליו כאל גבול לוחות מסוג טרנספורם. בגלל חשיבות המסקנה מן הראוי להדגיש מספר נקודות הקשורות לענין זה.

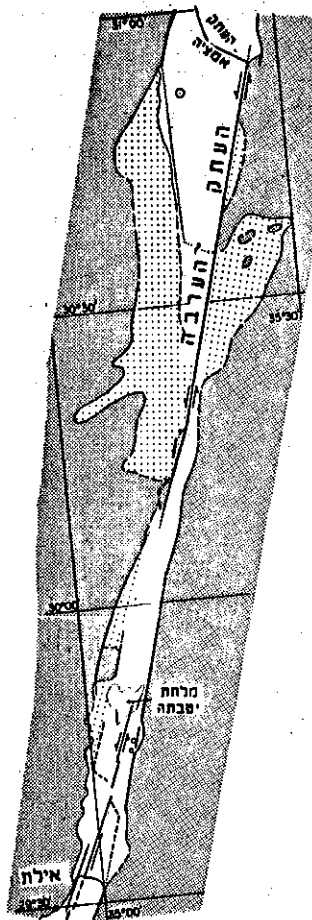
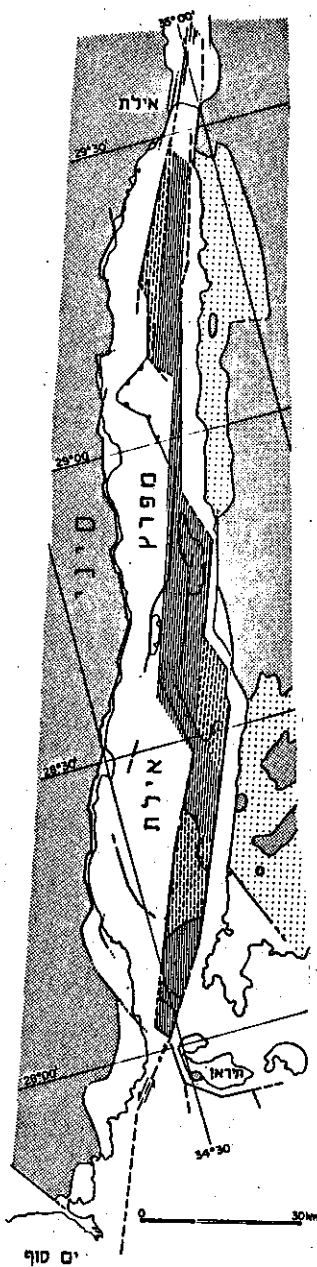
ראשית, השוני בין הגיאולוגיה של נקודות המצויות משני צדי הטרנספורם והמרחק 15-30 ק"מ זו מזו הוא תופעה חריגה בפלטפורמה הערבית-אפריקנית. לא מוכר שום מקום אחר כזה בין המפרץ הפרסי לאוקיאנוס האטלנטי מלבד באיזורי שבירה ידועים. לכן התופעה כחלט דורשת הסבר מיוחד. שנית, המצב לאורך טרנספורם ים-המלח הוא כמו שצפוי לאורך שברי תזוזה לטרלית אפקית (strike-slip). במלים אחרות, התצפיות הקיימות מתאימות לקריטריון שמזהה תנועה לטרלית. אין שום קריטריון בטוח אחר לזהוי תנועה לטרלית גדולה בעבר הגיאולוגי מלבד זהוי גופי סלע מוסטים. שלישית, ישנן מספר עדויות נוספות לתנועה לטרלית שמאלית במקביל לטרנספורם שיידונו בהמשך (שברים לטרליים צעירים באיזור אילת ובסיני, אופי שברים פעילים בקרקעית, ומנגנוני רעידות אדמה). רביעית, למודל התנועה הלטרלית כושר "חיזוי": אם מוכר טור הסלעים, או חלק ממנו, בנקודה מסוימת מצד אחד של הטרנספורם, הרי המודל מחייב שגוף דומה צריך להמצא מוסט מצדו השני. כאשר קנל הציע את מודל התנועה הלטרלית היה ידוע מעט אודות הגיאולוגיה של האיזור, ולכן אפשר היה לבחון את המודל ככל שהצטבר ידע רב יותר. במשך שלושים השנים שעברו מאז עבודתו של קנל כל הממצאים אישרו את התחזית של מודל התנועה הלטרלית ולא נמצאה שום חריגה. כמובן, שזהו כלי לבחינת המודל בעתיד. ולבסוף, המודל של התנועה הלטרלית שמבוסס על הגיאולוגיה המקומית תואם את המסקנה שנובעת מנתוח תנועת הלוחות באיזור ואשר מבוססת על מערכת

נתונים ושיקולים בלתי תלויים לחלוטין בגיאולוגיה של שולי טרנספורם ים-המלח. שתי הנקודות האחרונות חשובות במיוחד כי הן מראות שהמודל של טרנספורם ים-המלח עמד במבחנים שכל תיאוריה מדעית חייבת לעמוד בהם. לכן המסקנה שהיתה הסטה שמאלית בכדי 105 ק"מ לאורך טרנספורם ים-המלח יכולה לשמש כבסיס ורקע להכנת כל שאר התצפיות על מבנה זה.

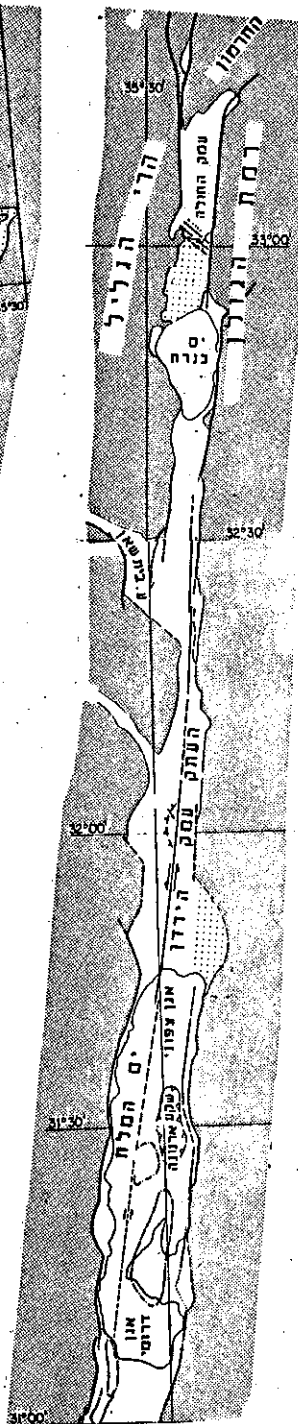
כאן המקום להציג מסקנה חשובה שנובעת ממודל זה: הוא מראה שלפני התנועה הצעירה על הטרנספורם לא היה באיזור שום מבנה שממנו יכול היה הטרנספורם להתפתח. גם אפשרות שחזור גופי סלע פרה-קמבריים מוסטים באיזו אילת ובסיני מראה שבתשתית של האיזור לא היה שום מבנה נכר לעין במקום שכעת ישנם שברים. במלים אחרות, הטרנספורם הנוכחי אינו מבנה עתיק שהופעל מחדש בקנוזואיקון. כל המבנים העתיקים יותר הם בעלי כוון שונה. הטרנספורם הוא, אם כן, מבנה חדש שפגע בקרום היבשתי באיזורנו.

מבנה טרנספורם ים-המלח : טרנספורם "דולף"

ההכרה ש"בקע" ים-המלח הוא בעצם טרנספורם נותנת בידינו כלי חשוב להבנת המבנים אשר מפותחים לארכו, ומאפשרת לדון בהם בצורה שיטתית במסגרת אחת. כדי להבין זאת, נסתכל בתחילה על הערבה, ים-המלח ועמק הירדן (ציור 1.4). לאורך הקרקעית של שקעים אלה נמשכים שברים ישרים אשר מצויינים על ידי שורות מצוקונים, חריצים ומעיינות. שברים אלה בולטים למדי למרות שאין לאורכם הסטה אנכית. כבר קנל הכיר שאלה שברי התזוזה האפקית (strike-slip) הפעילים אשר לאורכם מתרחשת התנועה הלטרלית שבין הלוחות של סיני-ישראל ושל ערב. המיוחד בשברים האלה הוא שהם אינם מסודרים בקו ישר, אלא מסודרים באופן מדורג. לזה מספר תוצאות חשובות, אם זוכרים שהתנועה עליהם היא לטרלית שמאלית. במצב כזה, המשך תנועת הלוחות אפשרי רק אם בין קצות השברים המדורגים נוצר סדק אלכסוני וככל שהתנועה נמשכת שני צדיו יתרחקו זה מזה ויווצר ביניהם פער או בור בעל צורה רומבית (ציור 1.5). יצירת בור כזה היא אם כן, תוצאה הגיונית של התנועה הלטרלית על השברים שמצויים בשטח. זה מסביר, כמובן, את מציאות השקע של ים-המלח בין הערבה ועמק הירדן, כפי שהוכר כבר על ידי קנל. סוג מבנה כזה נפוץ לאורך איזורי שכירה לטרלית וטרנספורמים, ונקרא רומב-גרובן (בספרות נפוץ גם המונח pull apart). שקעים כאלה בד"כ עמוקים מאד ביחס לרחבם. אם מתפתחים מספר רומב-גרובנים הם יהיו מסודרים בצורה מדורגת וכיניהם ישארו ספים (ציור 1.5ב). מודל זה מסביר היטב את מבנה השקעים לאורך טרנספורם ים-המלח: למשל, במפרץ אילת מצויים שלשה שקעים מסודרים בצורה מדורגת; גם עמק החולה מפותח בין שברים מסודרים בצורה מדורגת (ציור 1.4). שקעים כאלה מצויים גם בצפון-מערב סוריה. מודל הרומב-גרובנים מסביר את יחסי המבנה שלהם. המצבים שמתוארים



- פלעים עתיקים לביקוע
- פלעים עתיקים לביקוע, קבורים
- רומב גרביים עיקריים
- כלוקים מוגבהים בחור
- רומב גרביים
- העתקים עיקריים
- שקעים עמוקים



ציור 1.4: המבנים העיקריים לאורך החצי הדרומי של טרנספורם ים המלח: ממצרי תיראן ועד הלבנון.

בציור 1.5 הם כמובן, סכמתיים ונועדו רק להראות את יחסי המבנה הבסיסיים של רומב-גרבנים. במציאות המצב מסובך יותר בגלל מספר גורמים. כך, קירות הפערים יתמוטטו ולאורכם יתפתחו בלוקים שמוגבלים על ידי שברים נורמליים; מקום החבור בין שני שברי התזוזה האפקית יכול להשתנות במשך הזמן, ובנוסף לכך, והכי חשוב, הרומב-גרבנים מתמלאים בסלעי משקע בעובי רב. ברור שמלוי זה יתעוות וישבר גם הוא ככל שהתנועה הלטרלית נמשכת. חלקו ידבק ללוח אחד וחלקו ללוח אחר, ובין חלקים אלה יכולה להתפתח מערכת שברים מסובכת. המשך הצטברות המילוי יכסה שברים אלה בסדימנטים צעירים יותר; יתכן שהשברים יגדלו כלפי מעלה ויתכן שיתפתחו שברים חדשים. הבעיה היא שמלוי הסדימנטים מסתיר את המבנה העמוק. לכן בסה"כ ידוע מעט על המבנה העמוק של רומב-גרבנים. הבנת מבנה זה מהווה את אחת הבעיות החשובות שמחכות עדיין לפתרון.

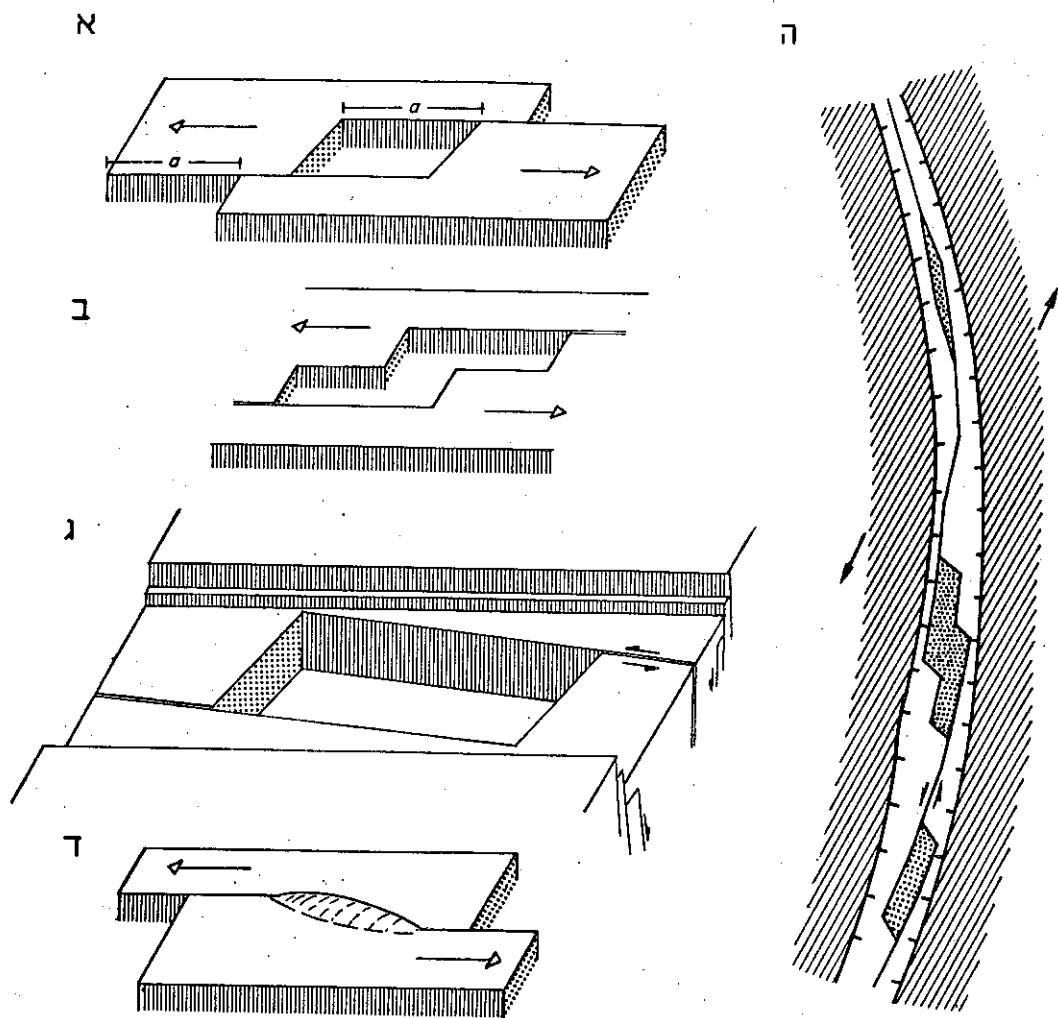
ביום-המלח עצמו קיים סבוך נוסף: לפני כ-5 מליון שנה חדר לשקע זה מפרץ של גופי מלח בעובי קילומטרים אחדים. המלח יוצר סלע רך יחסית אשר מסוגל לזרום לאט בצורה פלסטית אם פועלים עליו הכוחות המתאימים. ביום-המלח כוחות כאלה ישנם בגלל המשך תנועת הטרנספורם, וזה גרם לכך שהמלח התרומם בצורת "פקקים" (דיאפירים) אחדים. הגדול שבהם יוצר את הר סדום. זהו בעצם קיר של מלח באורך של יותר מ-10 ק"מ וברח 2-3 ק"מ שנדחף כלפי מעלה. גופים אחרים מצויים מתחת לחצי האי הלשון ובמקומות אחרים. התרוממות גופים אלה עוותה את הסדימנטים שמעליהם. בשולי הר סדום הסדימנטים הצעירים שהמלח חדר דרכם נטויים בחזקה, לעתים עד כדי 90 מעלות. ברור שסבוכי המבנה הללו אינם מייצגים את המבנה העמוק של שקע ים-המלח.

עם זאת חשוב להדגיש שלמרות הסבוכים ואי הודאות אודות המבנה הפנימי העמוק של הרומב-גרבנים, הסיטואציה הבסיסית שיוצרת מבנים כאלה - שברי תזוזה אפקית מדורגים - ברורה מאד. גם הסדור המדורג של הרומב-גרבנים ברור. התמונה הזו מתאימה להגיון הפנימי של מודל התנועה הלטרלית כי תמיד, ללא יוצא מן הכלל, הדרוג של השברים ושל השקעים הוא באותה מגמה, ודוקא במגמה הצפויה מכוון תנועה שמאלי.

תוצאה נוספת הנבועת מסדור השברים והרומב-גרבנים לאורך טרנספורם ים-המלח היא שכוון השברים המדורגים הוא בהכרח בזוית קטנה לכוון הכללי של הטרנספורם. זה מחייב שהתנועה הלטרלית, שהיא בכוון השברים, סוטה בזוית קטנה מן הכוון הכללי של הטרנספורם ולכן יש לה מרכיב פתיחה קטן פניצב לטרנספורם. לכל מעלה המבדל בכוון, המרכיב היצב הוא 1.7% מן התנועה הלטרלית. ברור שבמקרה שלנו המרכיב הנצב קטן. למעשה, יתכן מאד שהתנועה האלכסונית היא הגורם ליצירת

שברים מדורגים ורומב-גרבנים ביניהם. תנועה אלכסונית של הלוחות יכולה גם לגרום להתרחקות קירות הטרנספורם זה מזה תוך נטיה להוצרות חלל ביניהם. במציאות חלל כזה לא יתקיים כי קירותיו יתמוטטו ויווצרו לאורכם שברים נורמליים. גם זה יתרום ליצירת עמק לאורך הטרנספורם, ועמק כזה יהיה מוגבל בשברים נורמליים למרות שהתנועה בעיקרה לטרלית. במקרה של טרנספורם ים-המלח נראה שקיימים שני סוגי המבנה - כי מערכת השברים המדורגים והרומב-גרבנים שביניהם מפותחת לאורך הקרקעית של השקע שמוגבל על ידי שברים נורמליים (ציור 1.5ג). המבנה של עמק מוגבל על ידי שברים נורמליים הוא שהביא לכך שהתייחסו לטרנספורם ים-המלח כאל בקע רגיל. ברם מבנהו המיוחד וקיום שברי תזוזה אפקית מתאימים למודל התנועה הטרלית ושונים ממבנה של בקעים שעיקר התנועה של שוליהם היא התרחקות נצבת. האמור לעיל מוביל להסתכלות כללית יותר. ראינו שהמבנה המיוחד של טרנספורם ים-המלח נובע משום ששני צדיו מתרחקים קצת זה מזה, ושהעמק שלאורכו מבטא את התרחקות שני צדיו. האם זה תמיד קורה לאורך טרנספורמים? לאו דוקא. יתכן, כמובן, מצב שעם המשך התנועה הטרלית שני צדי הטרנספורם יתאימו בדיוק זה לזה, אבל זה מצב מאד מיוחד: על פני כדור (כמו כדור הארץ) זה יתכן רק אם לטרנספורם צורת מעגל. במקרה זה בכל מקום כוון התנועה יהיה בדיוק מקביל לכוון הטרנספורם, כך ששני צדיו יתאימו בדיוק זה לזה. אבל צורתם של שברים בקרום כדור הארץ בד"כ לא כל כך רגולרית, ולכן יש לצפות שברך כלל יהיו סטיות ממצב זה. המקרה שתואר לעיל הוא שקירות הטרנספורם יתרחקו זה מזה כיוון שהם בזוית קטנה לכוון התנועה. סוג כזה של טרנספורם נקרא טרנספורם "דולף" כי לאורכו נפער שטח חדש, ויתכן וחמר עמוק "ידלוף" לתוכו. אבל גם המצב ההפוך יתכן: שני צדי הטרנספורם יכולים ללחוץ זה על זה אם כוון הטרנספורם סוטה כמגמה המתאימה מכוון התנועה (ציור 1.5ד). יתכן גם שלאורך אותו טרנספורם יהיו קטעים מכל הסוגים.

מצב כזה קים בלבנון. שבר ימונה, שמצוין שם את הטרנספורם, כפוף חזק ימינה כהשוואה לכוון הטרנספורם בעמק הירדן (ציור 1.1). מודל התנועה הטרלית מחייב, כמובן, במקרה זה, שקצות הלוחות שממני צדי הטרנספורם יילחצו חזק זה לזה (ציור 1.5). לחיצה זו היא שדחפה כלפי מעלה והרימה את הרי הלבנון והרי חרמון-מול הלבנון וגרמה לקמוט הצעיר בבקעת הלבנון. גבהם הגדול של הרים אלה הוא חריג על רקע ההתרוממות האיזורית המלווה את ביקוע היבשות באיזור, ולכן צריך לחפש גורם מיוחד כדי להסביר יצירת הרים אלה. מודל התנועה הטרלית נותן לנו את ההסבר הנוסף הדרוש. קיום משטר לחיצה לאורך קטע זה של הטרנספורם גם מסביר מדוע אין לארכו עמק מוגבל על ידי שברים נורמליים, כי מבנה כזה נוצר רק במקום ששני צדי הטרנספורם מתרחקים זה מזה.



ציור 5: יצירת מבנים לאורך שבר תזוזה לטרלית

- א. יצירת רומב-גרבן. המודל הזה סכמתי וכמציאות ישנם סבוכים (ראה מאמר).
- ב. התפתחות רומב-גרבן מורכב כתוצאה מאחוד שני רומב-גרבנים סמוכים.
- ג. מודל סכימתי של יחסי המבנה בטרנספורם ים-המלח.
- ד. יצירת מבנה לחיצה לאורך כפוף ימינה של שבר הזז שמאלי.
- ה. מבט מפה סכמתי של יחסי המבנה בטרנספורם ים-המלח השווה עם (ג).

זהו, כמובן רק הסבר איכותי. הכרת גודל התנועה הלטרלית וצורת הטרנספורם מאפשרת לחשב את גודל ההתקצרות הנצבת הצפויה בהר הלבנון והחרמון. ברם, הידע הנוכחי אודות מבנה איזורים אלה איננו מספיק כדי לבחון אם אמנם ישנה התאמה בין המבנה בשטח לתחזית המודל. זו אחת הבעיות החשובות הנוגעות לטרנספורם-המלח ואשר עדין מצפות לפתרונן. בעיה נוספת הקשורה לאיזור זה היא הבנת מבנה הגליל. הסתכלות על המפה (ציור 1.1) מראה שבגלל התנועה הלטרלית לאורך הטרנספורם איזור זה חלק על פני נקודת הכפוף של הטרנספורם שמצויה מצפון לעמק החולה, הגליל שונה משאר חלקי ארץ ישראל בכך שהוא שבור בחזקה ובצורה מסובכת. שבירה זו התרחשה בזמן התנועה לאורך הטרנספורם, דבר המראה שיש קשר בין שתי התופעות. לא נכנס כאן לפרטים, אך חשוב לציין רק שתי נקודות. ראשית, השבירה בגליל גרמה לכך שאיזור זה התארך בכוון צפון-דרום וגם התקצר, לפחות בתקופה מסוימת, בכוון מזרח-מערב, דבר ש"עזר" לו לעבור על פני נקודת הכיפוף של הבקע. שנית, הדפורמציה הצעירה באיזור זה נמשכת עד לתוך היס התיכון; סביר שדפורמציה צעירה בעוצמה דומה התרחשה באיזור רחב גם ממזרח לטרנספורם, בהרי החרמון. נראה, לכן, שהכפוף של הטרנספורם בהרי הלבנון גרם לעוות שטח רחב למדי, בעוד ששולי הקטעים ה"דולפים" של הטרנספורם עוותו מעט מאד. הבנת התופעה הזו, והבנת מבנה האיזור שבין עמק יזרעאל ועד דמשק ובהרי הלבנון בכלל, עדין לא שלמה ומהוה נושא למחקר מתמשך.

אם מסתכלים בפרוט במפה (ציור 1.4) רואים שגם מדרום להרי הלבנון ישנם מספר מקומות בהם קו השבירה הלטרלית מתכופף קצת ימינה וגם שם ישנם ספים טופוגרפיים ולחיצה והתרוממות של גושים כלפי מעלה. המקומות הבולטים ביותר הם מצפון מזרח ליריחו (קרין סבט) במרכז הערבה (ג'בל חוריג וג'בל רישה) ובמיצרי תיראן (האי תיראן התרומם מאד בתקופה צעירה, כי ריפים צעירים מצויים בו בגובה של יותר מ-500 מ' מעל פני הים!).

הדיון הזה מראה כיצד מודל התנועה הלטרלית מאפשר להסביר את כל פרטי המבנה לאורך טרנספורם ים-המלח מנקודת מבט אחת ולהראות את הקשר ההגיוני בין המבנים האלה (Garfunkel, 1981; Freund, 1965; Quennell, 1959). במקרה שלנו העדויות לתנועה הלטרלית מבוססות על תצפיות שאינן נוגעות כלל לפרטי המבנה לאורך הטרנספורם. אבל חשוב גם להדגיש שמסכת מבנה כזו המצויה לאורך טרנספורם ים-המלח, מצויה רק לאורך איזורי תנועה לטרלית. לכן מסכת מבנה כזו לכשעצמה מקובלת כדיאגנוסטית לתנועה לטרלית וכמוכחה קיומה של תנועה כזו.

לנתוח של מבנה הרומב-גרבנים יש גם השלכות חשובות על ההיסטוריה של הטרנספורם. כפי שניתן לראות מציור 1.5א, במקרה האידיאלי אורך הרומב-גרבן שווה לגודל

התנועה הלטרלית שהתרחשה בזמן יצירתו. למעשה יש לצפות לשקעים ארוכים יותר, כי קירותיהם מתמוטטים, אבל אין דרך ליצור רומב-גרבנים קצרים יותר. מבט חטוף במפה (ציור 1.4) מראה שכל הרומב-גרבנים הפעילים קצרים מ-50 ק"מ. אגן החולה, למשל, בעל אורך של 15-20 ק"מ בלבד. זה מראה שהתנועה שיצרה את המבנים בצורתם הנוכחית היתה קטנה בהרבה מן ההסטה הכוללת לאורך הטרינספורם. רק שקע ים-המלח בעל אורך דומה לכל התנועה, אבל חלקו המשתפל ביותר - האגן הצפוני שלו - קצר בהרבה. המסקנה מתצפית זו היא שמבנים אלה, ומסכת השברים שאחראית ליצירתם, נוצרו בשלבים הצעירים יחסית של התפתחות הטרינספורם. גם נראה שלא כל הרומב-גרבנים נוצרו באותו זמן, אם כי הדרומיים שבהם (צפון ים-המלח והאגנים במפרץ אילת) בעלי אורך די דומה ויכלו להווצר פחות או יותר באותו זמן. זו מסקנה חשובה ומפנה את תשומת הלב לתולדות טרינספורם ים-המלח.

ההסטוריה של טרינספורם ים-המלח

המצב הנוכחי של הטרינספורם, כפי שתואר לעיל, הוא תוצאה של כל המאורעות שהתרחשו במשך תולדותיו. לכן כדי להבין היטב את התצפיות הכרחי לדעת מתי החלה התנועה הלטרלית, באיזה קצב היא התרחשה, ומה היה כוונה המדויק בתקופות השונות. חשוב גם לדעת איזה מבנים נוצרו בכל תקופה ותקופה. הידע הקיים מאפשר רק לתת תשובות חלקיות לשאלות אלה.

את גיל ראשית התנועה ניתן לתחום מתוך הידוע על ים סוף. ראינו שיצירתו, המבטאת את התרחקות הלוח הערבי מן הלוח האפריקני, קשורה בצורה הדוקה להתפתחות טרינספורם ים-המלח שאליו נמשכת רוב התנועה הזו. כיון שהתרחקות הלוחות משני צדי ים סוף היא פחות או יותר נצבת, הרי תכף עם תחילת התנועה מוכרח להווצר לאורכו שקע, וזה יתמלא מיד בסדימנטים. גיל הסדימנטים העתיקים ביותר ביס סוף, כ-25 מליון שנה (מיוקן מוקדם ביותר) הוא, לכן, הגיל של תחילת תנועת הלוחות (הוולקניזם אשר לווה את בקוע היבשות החל קצת יותר מוקדם). יתכן שבהתחלה כל פתיחת ים סוף נספגה על ידי פתיחת מפרץ סואץ. אבל כיון שפתיחה זו היא בסך הכל קטנה, יוצא שכאשר פתיחת ים סוף הגיעה לכדי מספר עשרות קילומטרים, טרינספורם ים-המלח מוכרח היה להיות פעיל, כי רק כך הלוח הערבי יכול היה להתרחק כל כך הרבה מן הלוח האפריקני. כיון שההסטוריה של ים סוף אינה ידועה בפרוט, קשה לדעת מתי בדיוק הוא הגיע לשלב זה.

עדות נוספת אודות תחילת התנועה על טרינספורם ים-המלח נתנת על ידי המבנה של שוליו הדרומיים. באיזור אילת ודרומה יותר בסיני, וגם בהרי אדום ומדין, מפותחת מערכת בולטת של שברים כוון קרוב לצפון-דרום באיזורים ברחב עד 30 ק"מ מכל צד של הטרינספורם. שברים אלה מסיטים גופים רבים של סלעים פרה-קמבריים. ככולם ההסטה היא שמאלית, כמו של הטרינספורם, וגדל ההסטה הוא

ממאות מטרים ועד כמה קילומטרים (Eyal et al., 1981; Garfunkel, 1979). במקומות ישנו סדור שברים מדורג ושם נוצרו רומב-גרבנים אשר לתוכם השתפלו סלעי הכסוי הסדימנטרי של איזורים אלה. במקומות השברים הללו מסיטים סלעים אוקניים וסלעים צעירים יותר, דבר המעיד על פעילותם הצעירה. איל, ברטוב, איל ושטייניץ (Eyal et al., 1981) גילו שבנוסף לכך שברים אלה גם מסיטים דייקים בזלתיים שכונם צפון-מערב, ושגילם הוא 20-25 מליון שנה. דייקים אלה שייכים למערכת שנמשכת למרחק רב משני צדי ים סוף ואשר נוצרה בראשית תהליך הבקע. חוקרים אלה גם גילו שהסלעים הפרה-קמבריים מוסיטים על ידי השברים באותה מידה כמו הדייקים. זה מראה שכל התנועה הלטרלית באיזור מאוחרת לדייקים. לכן הגיוני להסיק שלפני 20-25 מליון שנה לא היתה תנועה לאורך טרנספורם ים-המלח. מערכת השברים הזו מהווה גם עדות בלתי תלויה לקיום תנועה לטרלית שמאלית במקביל לטרנספורם ים-המלח. באיזור זה חלק מהתנועה בין הלוח הערבי ולוח סיני התרחש, אם כן, ברצועה ברוחב 50 ק"מ ויותר על שברים רבים, ולא באיזור צר כמו צפונה יותר. באיזור שמול מרכז מפרץ אילת התנועה על כל השברים הללו היתה בגודל כמה עשרות קילומטרים. מעניין גם לציין ששברים אלה כנראה אינם פעילים כיום. למשל, הם אינם מסיטים גופי סחף. נראה לכן, שבאיזור זה חל שינוי באופי הפעילות של טרנספורם ים-המלח.

עדויות אלה רק מוכיחות שטרנספורם ים-המלח צעיר ל-20-25 מליון שנה, אך אינו מספיקות לקביעת זמן יצירתו המדויק. ישנן מספר עדויות שמראות שחלק גדול מן התנועה עליו תתרחש כבר במיוקן. העדות המוצקה ביותר נתנת על ידי הגיאולוגיה של ים סוף, שמראה שבסוף המיוקן כבר התקיים לאורכו אגן רחב ועמוק שבו הצטברו קילומטרים אחדים של סדימנטים מיוקניים, ושמאז כ-5 מליון שנה הפתיחה בצפונה היתה כ-40 ק"מ בלבד. לפי האמור לעיל, זה מראה שבתקופה זו התנועה על טרנספורם ים-המלח היתה 35-40 ק"מ (חלק מפתחת ים סוף העבר למפרץ סואץ). בקצב כזה ההסטה הכוללת של 105 ק"מ יכלה להתרחש במשך 13-15 מליון שנה. העדויות מהטרנספורם עצמו מעטות, אך מתאימות למסקנה זו. כך, באיזור שמצפון לגלבוע ישנו אגן שהתפתח כבר במיוקן התיכון והצטברו בו מאות מטרים של בזלות וסדימנטים ("בזלת תחתונה" ותצורת הורדוס). אגן זה הוא בעצם הקצה המזרחי של מערכת השברים שיצרה את עמק יזרעאל. ברור שהטרנספורם הנוכחי היה הגבול המזרחי של האגן הזה ושל מערכת השבירה הזו. זה מוכיח שהטרנספורם היה כבר אז קו סטרוקטורלי חשוב. דרומה יותר, בערבה, נראה שהתקיים אגן שבו הצטברו משקעי תצורת חצבה. החתך העבה שנמצא בקדוח ערבה1 (בערבה הצפונית), שנחשב למיוקני, מוכיח שהתקיים כאן אגן עמוק מאד, שנתן לפרוש כרומב-גרבן במיוקן (במדה וקביעת הגיל נכונה). בערבה הדרומית, בג'בל חוריג', התגלו סלעים ימיים שגילם נקבע כמיוקן (Bender, 1968); במדה וגיל זה יאומת תהיה בכך הוכחה שמפרץ ימי, ככל

הנראה מפרץ אילת - כבר התקיים אז. גם סדימנטים מסוימים באיזור אילת (קונגלומרט רחם) פורשו כמעידים על קיום "פרוטו" מפרץ אילת. אין ספק שהעדויות הללו אינן חד משמעיות, אך הן תואמות את המסקנה המתחייבת מנתוח תנועת הלוחות ופתיחת ים סוף. למעשה נתוח זה לכשעצמו מספיק כדי להוכיח שהטרנספורם פעל במיוקן. אי הודאות אודות מבנה הטרנספורם במיוקן נובעת מכך שאין הרבה סלעים מגיל זה לארכו. נראה, לכן, שלא התקיים לארכו שקע דומה לנוכחי. מתוך הבנת הגורמים הקובעים את מבנה הטרנספורם זה מביא למחשבה שבמיוקן כוון התנועה של הלוחות היה שונה מהנוכחי וקרוב יותר לכוון הטרנספורם. כפי שראינו, אפילו שינוי של מעלות אחדות בכוון התנועה יכול היה לגרום לכך שחלקים מן הטרנספורם שכיום הם "דולפיס" היו במשטר לחיצה. יתכן גם ששברי ההסטה האפקים שבשולי הקטע הדרומי של הטרנספורם, שאינם פועלים עוד, נוצרו מפני שבעבר תנועת הלוחות היתה קצת שונה מאשר כיום. שקולים אלה מראים שיש לבחון היטב את המבנים המיוקניים באיזור הטרנספורם, וזה נושא שעדיין אינו מובן כהלכה. ידוע שמשקעי תצורת חצבה (מגיל מיוקן תחתון-תיכון, ז.א. קדומה ל-15-10 מליון שנה) חצו את הטרנספורם באיזור ים-המלח וכנראה גם דרומה לו, דבר שמעיד שאם היה שם שקע הוא היה סתום לגמרי ע"י סדימנטים; אך יתכן גם שנוצר שם שקע רק לאחר יצירת משקעי תצורת חצבה. בעיה מיוחדת מתעוררת ע"י שברי הרחב בנגב (קו סעד-נפחא, קו פארן) שפעלו כשברי תזוזה ימנית במיוקן ובפרט לאחר סיום השקעת תצורת חצבה. האם יתכן שהם פעלו ביחד עם טרנספורם ים-המלח? אין הוכחות לכך, אך צריך לזכור שכיום שברי תזוזה שמאליים וימניים שנפגשים פעילים בדרום-קליפורניה, דבר המוכיח ששברי הנגב המרכזי והטרנספורם יכלו לפעול בו זמנית. לפיכך המצב במיוקן התיכון עדיין לא ברור.

המחשבה שחל שינוי מסוים בכוון התנועה של הלוחות והוא שגרם לכך שהטרנספורם נעשה "דולף" יותר משתלבת עם עוד שיקולים אחדים. ראשית, ראינו שנתוח מבנה הרומב-גרבנים מראה שהם מכנים צעירים יחסית לאורך הטרנספורם. בהחלט הגיוני לקשור את יצירתם בשינוי כוון התנועה. שנית, נתוח תנועת הלוחות מחייב שינוי כזה כי כוון התנועה הנוכחי לא יכול היה להתקיים במשך כל ההסטוריה של הטרנספורם: בקצב הנוכחי של ה"דליפה" רחב הטרנספורם צריך היה להיות גדול בהרבה ממה שהוא באמת. אין שום דבר יוצא דופן בשינוי של תנועת הלוחות; למעשה זו תוצאה הכרחית של הגיאומטריה של תנועות הלוחות על פני כדור הארץ. דוקא קביעות מוחלטת של תנועת הלוחות היא היוצאת מן הכלל.

מכל האמור מצטיירת התמונה הבאה: טרנספורם ים-המלח נוצר במיוקן, אולי במיוקן תיכון. בתחילה התנועה עליו היתה כמעט מקבילה לכוונו ולכן לא נפתח לאורכו שקע רחב; יתכן והיתה לאורכו יותר לחיצה מאשר כיום. מתי שהוא, אולי בסוף

המיוקן, כוון התנועה השתנה וחלק גדול של הטרנספורם הפך לדולף ואז נוצרו בו הרומב-גרבנים הנוכחיים. גיל השינוי אינו ידוע, ויתכן והיה הדרגתי. גם יתכן שהרומב-גרבנים נוצרו בזמנים שונים. יתכן שאגן ים-המלח, שהוא ארוך מאוד, נוצר כבר בשלבי התנועה הראשונים, אך אח"כ מבנו השתנה, והאגן הצפוני שלו הפך ליחידה נפרדת. מכל מקום, בזמן יצירת תצורת סדום נראה שעמק הירדן כבר התקיים, וברור ששקע ים-המלח היה קיים. קביעת פרטי התהליך של יצירת האגנים לאורך הטרנספורם גם הוא משימה חשובה שלא הושלמה. לשם כך צריך לדעת הרבה יותר על גיל המלוי הסדימנטרי של אגנים אלה.

היחס בין טרנספורם ים-המלח ותולקניזם

בהשוואה לבקעים של מתיחה, הוולקניזם לאורך טרנספורם ים-המלח, ובעיקר בתוכו, מצומצם. זה נובע בודאי מכך שמדובר כאן בטרנספורם ולא בבקע של מתיחה. למעשה לא ברור אם יש קשר סיבתי ישיר בין יצירת הטרנספורם לבין הוולקניזם; יתכן מאוד שוולקניזם מבטא את התהליכים מתחת לליתוספירה שגרמו לביקוע היבשות. בצורה זו יש להסתכל על התופעות הוולקניות שמצויות למשל, ממזרח לים-המלח וממזרח לערבה (ציור 1.1). כפי שראינו הוולקניזם ברמת הגולן קשור לתופעה נרחבת שנמשכת הרחק מזרחה, ללא קשר ישיר לטרנספורם. יתכן שהוולקניזם של הגליל קשור גנטית לשבירה של עמק יזרעאל, אך לאור הרקע הרגיונלי קשה לקבוע, במצב הידע הנוכחי, יחס סיבה ומסובב בין הטרנספורם והמגמתיזם שלידו.

עם זאת חשוב לציין שישנן כמה הופעות של סלעים וולקניים ממש לאורך הטרנספורם. כך, בקרין סבט (בעמק הירדן, מצפון-מזרח ליריחו) מופיעה בזלת בעור שבשולי הטרנספורם הסמוכים לא מוכרת פעילות כזו. טורי בזלת בעלי עובי גדול, שלא היה צפוי מראש, נתגלו בקדוחים ליד צמח ועמק החולה. יתכן, אמנם, שאלה בזלות שזרמו לתוך הטרנספורם משוליו, אך לא מן הנמנע שמדובר כאן במאגמות שהתרוממו ממש לאורך שברי הטרנספורם. הופעות אלה מעלות האפשרות שיש במלוי הטרנספורם יותר חמר מאגמתי משמשוער כעת, ושבמקומות מאגמות התרוממו לאורך הטרנספורם עצמו.

הפעילות הטקטונית הצעירה

טרנספורם ים-המלח הוא מבנה פעיל, כלומר תנועת הלוחות שמשני צדיו נמשכת, וגם תנועת השברים שבתוכו נמשכת. עם זאת, עקבות שבירה צעירה לא כל כך בולטים לאורכו. זהו פרדוכס לכאורה בלבד. צריך לזכור שרוב השברים הפעילים חוצים איזורים שבהם מצטברים סדימנטים. לכן אנו רואים אותם בתוך סלעים צעירים, בעלי גיל של עד מספר מאות אלפי שנה בלבד. כיוון שתנועת השברים בפרקי זמן כאלה מתרחש בקצב ממוצע של עד מ"מ אחדים לשנה, הרי שהסדימנטים הצעירים

"הרגישו" רק תנועה מועטת - של מטרים אחדים או מספר עשרות או מאות מטרים בלבד. משום שברי התזוזה האפקית שבערבה ובעמק הירדן אינם מרשימים כלל - ההסטה עליהם מאז יצירת הסדימנטים הצעירים באיזורים אלה היתה קטנה. השבר בערבה בולט יותר כי הוא מסיט סדימנטים עתיקים יותר - ז.א. רואים רישום ארוך יותר של תנועתו - יש עליו מספר רומב-גרבנים קטנים ועוד מבנים שקשורים לשברי תנועה לטרלית (Garfunkel et al., 1981; Zak and Freund, 1961) מול תמנע יתכן והסדימנטים הוסטו כדי מספר מאות מטרים. מצפון לים המלח נכרות תנועות בתצורת הלשון הצעירה; חפירות באיזור השבר (Reches and Hoexter, 1981) גילו שמדובר בעוות נכבד. כיון שעוות זה פגע בסדימנטים שגילם אולי עשרות אלפי שנה בודדים*, ברור שמדובר בפעילות חזקה בקנה מידה גיאולוגי: פעילות בקצב כזה היתה גורמת לעוות חזק מאד לו נמשכה מליון שנה. לכן, ככל שסימני התנועה האפקית לאורך הטרינספורם נראים צנועים, הם מעידים שבפרקי זמן של מספר מליוני שנה התרחשה פעילות משמעותית שיכולה לגרום לתוצאות מרשימות מאד. פעולת השברים הנורמליים יותר בולטת, כי מטבעה יש לה ביטוי בנוף - היא יוצרת מצוקים. אבל פעילות זו היא משנית בטרנספורם, ולכן נכרת פחות בסדימנטים הצעירים מאד. לאורך פרקי זמן קצרים התנועה על שברים אינה רצופה, אלא מתרחשת בקפיצות של עשרות ס"מ עד מטר ויותר, ואז מתרחשות רעידות אדמה. ואמנם, תצפיות במכשירים במאה הנוכחית, ודווחים היסטוריים מראים שהרבה רעידות אדמה מקורן היה לאורך הטרינספורם, בעוד שבשוליו יש מעט רעידות אדמה. רעידות אדמה הרסניות מתרחשות אחת ל-100-150 שנה. האחרונה היתה ב-1927, והמוקד שלה היה מדרום לגשר דמיה; זו שלפניה היתה ב-1873 ומוקדה היה בעמק החולה, כנראה, והיא גרמה לנזקים כבדים בצפת. נראה שרעידות אלה התרחשו בעקבות תנועה על שברי התזוזה האפקית. פענוח המנגנונים של מספר רעידות אדמה לאורך הטרינספורם, כולל של הרעידה של 1927 (Ben Menahem et al., 1976) הראה תנועה לטרלית שמאלית לאורך הטרינספורם. קצב הפעילות הסייסמית מראה שהתנועה היתה במהירות של לפחות 3-4 מ"מ לשנה במשך אלפי השנים האחרונות. הפעילות הסייסמית היא ההוכחה הברורה ביותר שטרנספורם ים-המלח הוא פעיל. אבל רק ההבנה שפעילות זו צריכה להמדר על פני פרקי זמן גיאולוגיים, ולא אנושיים, מראה לנו שמדובר במבנה חשוב מאד מבחינה גיאולוגית.

* האופי הטופוגרפי של השברים הפעילים האלה היא כמו של שברים אחרים בעולם שראו עליהם תזוזה לטרלית, ושונה לגמרי מאופיים של שברים נורמליים. זו הוכחה בלתי תלויה לתנועה שמאלית לאורך הטרינספורם.

מונחים

1. ליתוספירה - החלק החיצוני של כדור-הארץ, בעובי כ-100 ק"מ, שהוא בנוי סלעים קרים וקשיחים.
2. לוחות ליתוספריים - הליתוספירה מחולקת למספר יחידות, שנקראות לוחות, ואשר נמצאות בתנועה זו ביחס לזו (כל לוח יכול לכלול שטחים יבשתיים ואקיאניים). הפעילות הגיאולוגית העקרית מתרחשת לאורך הגבולות בין הלוחות.
3. פלטפורמה - איזור יבשתי יציב יחסית, מצוי בפנים לוח ליתוספרי. איזורים כאלה בד"כ משתפלים ובחלקם מוצפים מדי פעם על ידי ימים (בזמנים של עליית פני הים, מאורע שנקרא טרנסגרסיה).
4. אורוגן - איזור של עוות חזק מאד של סלעים ושל פעילות מגמתית רבת היקף. אורוגנים נוצרים באיזורים שבהם לוחות ליתוספריים נעים האחד כלפי השני, ז.א. הם מתפתחים לאורך גבולות לוחות שיש לאורכם התנגשות. בזמן שפעילות זו מתרחשת האורוגן הנו בעל נוף הררי. שרשרות ההרים הגבוהות בעולם - האנדים, ההימליה וכו' נוצרו בדרך זו.
5. מזוזואיקון - תקופה בתולדות כדור-הארץ. בין 65-250 מליון שנה. בתקופה זו היבשות נשלטו על ידי הרינוזאורים. התקופה שלאחריה נקראת קנוזואיקון ונמשכת עד היום.

ביבליוגרפיה

1. Bender, F. Geology of Jordan, Beitr. Regional. Geologie Erde, Suppl. 7, p. 196. 1974.
2. Ben-Menahem, A., Nur, A., Vered, M., Tectonics, seismicity and structure of the Afro-Eurasian junction - the breaking of an incoherent plate, Phys. Earth Planetary Interiors, Vol. 12, p.1-50 1976.
3. Eyal, M., Eyal, Y., Steinitz, G., The tectonic development of the western margin of the Gulf of Elat (Aqaba) rift, Tectonophysics, Vol. 80. p. 39-66. 1981.
4. Freund, R., A model of the structural development of Israel and adjacent areas since Upper Cretaceous times. Geol. Mag., Vol. 102. p. 189-205. 1965.

5. Freund, R., Garfunkel, Z., Zak, I., Goldberg, M., Wessbrod, T., Derin, T., The shear along the Dead Sea rift, Philos. Trans. Royal Soc. London. Ser A, V. 267. p. 107-130. 1970.
6. Garfunkel, A., Contribution to the Geology of the Precambrian of the Elat area. Isr. Jour. Earth Sciences, Vol. 29. p. 25-40. 1979.
7. Garfunkel, Z., Internal structure of the Dead Sea leaky transform (rift) in relation to plate kinematics, Tectonophysics, Vol. 80, p. 81-108. 1981.
8. Quennell, A.M. Tectonics of the Dead Sea rift, International Geo. Congress 20th (mexico): Assoc. Serv. Geol. Afr. p. 385-405. 1956.
9. Reches, Z., Hoexter, D.F., Holocene tectonic activity in the Dead Sea area. Tectonophysics, Vol. 80, p. 235-254. 1981.
10. Zak, I., Freund, R., Recent strike-slip movements along the Dead Sea rift. Isr. Journ. Earth Sci., Vol. 15, p. 33-37. 1966.