

THE LEF MODEL · A SERIES OF TWELVE PAPERS

Lunar Elevation & Fission

9. הפסים

הצד המוביל של האגס על קרקעית האוקיינוס השקט, והמקום שבו נוצר הירח

חלקים A–H · הפסים · קצה האגס · הימות על כדור הארץ · רכסי השפכטל

זהר דוראן

חוקר עצמאי, רמלה, ישראל

ORCID <https://orcid.org/0009-0005-3194-9387>

תרגום מלא לעברית של המאמר האנגלי · 15 באוקטובר 2026 · סעיף C.5 נוסף ב־18 באוקטובר 2026

את קרקעית האוקיינוס בצפון האוקיינוס השקט חוצים פסים ארוכים וישרים — Pioneer, Mendocino, Clipperton ו-Clarion, Molokai, Murray — שאורכם אלפי קילומטרים והם מקבילים זה לזה. הם נראים בבירור הרב ביותר במפות של גרדיאנט הכבידה האנכי (VGG), שמראות היכן משיכת הכבידה משתנה בחדות לאורך מרחק קצר, ולכן מבליטות מבנים צרים בקרקעית ומתחתיה. בסדרה הזו הירח נבנה על קצה האגס, אגס שעשוי מחומר של כדור הארץ עצמו, שהבסיס שלו עמד על האוקיינוס השקט ליד Kiritimati, ושנאסף בחזרה לתוך כדור הארץ אחרי שהירח נותק (מאמר 3, *LEF Mechanism in Practice*). האגס נטה לאחור, נגד כיוון הסיבוב של כדור הארץ: הקצה שלו פיגר מערבה, החזית שלו — הצד הפונה אל כיוון הסיבוב, הצד המוביל — פנתה מזרחה, והגב שלו, הצד המאסף, פנה מערבה. המאמר הזה קורא את הפסים כצד המוביל של אותו אגס: הצד שפנה אל הסיבוב של כדור הארץ, שנמתח כל עוד האגס היה מחובר, ושהתקפל לפסים כשהאגס נאסף בחזרה.

הגיאומטריה מתאימה לקריאה הזו בארבע דרכים. הפסים הם מקבילים של קו משווה אחד, ובסיס האגס נמצא על קו המשווה הזה (1.6° ממנו). "מקבילים של קו משווה אחד" פירושו שכל פס שומר על מרחק קבוע ממעגל גדול אחד, כמו שקווי הרוחב שומרים על מרחק קבוע מקו המשווה של כדור הארץ — רק שכאן קו המשווה נטוי. קווים מן הסוג הזה הם מה שתנועת סיבוב אחת סביב ציר אחד משרטטת, ושישה קווים כאלה שחולקים קו משווה אחד הם אילוץ גיאומטרי חזק על האופן שבו הם נוצרו. הפסים יוצאים מן הבסיס מזרחה, לכיוון אמריקה. שני כיפופים בפסים ממערב לבסיס, אחד בצפון שמתכופף כלפי מטה ואחד בדרום שמתכופף כלפי מעלה, רחוקים זה מזה 3,360 ק"מ — הרוחב של המגע בין 3,000 הק"מ שעליו ישב הירח, ושל הכיפה בת 3,650 הק"מ שמעליו; המרכז שלהם נמצא כ-3,760 ק"מ ממערב לבסיס, בצד המאסף, במקום שבו אגס שנטה לאחור היה מציב את הקצה שלו. בתוך הקצה הזה נמצאת טביעת הצד הקרוב של הירח, כתמונת ראי — שני הפנים עמדו זה מול זה, כך שכמו בחותם שנלחץ לתוך שעווה, מזרח ומערב מתחלפים ואילו צפון נשאר צפון — מוגדלת פי 1.37, שהוא ההתכווצות של הירח מן הצפיפות של הגוף שעל הקצה אל הצפיפות שלו היום: אותה מסה, שנדחסה לנפח קטן יותר, מקצרת כל מרחק על פני השטח שלה באותו יחס. כש-Imbrium ממוקם ב- 13.2° צפון, 179.0° מזרח, Serenitatis נופל על שרשרת Marshall ומרכז המגע לצד Imbrium, כולם בתוך טביעת הקצה.

הפסים עוברים מתחת לרכסים הוולקניים שחוצים אותם, בלי להיקטע: הם נוצרו בקיפול מן הצדדים ומלמטה, ולא נחתכו מלמעלה. שרשראות הרכסים הגדולות משני הצדדים — שרשראות Marshall-Gilbert-Tuvalu במערב ו-Line Islands במזרח — נקראות כרכסי השפכטל, השוכנים בתוך קצה האגס עצמו, בחלקו שהתקלף: הם נמשכו כלפי מעלה מתוך החומר של המגע, שעוד היה רך, במהלך ההתקלפות של הירח, כשהמגע הצטמצם מ-6,000 ל-3,000 ק"מ, כשנמשך החוצה בכוח — כמו הרכסים שהטיח משאיר כשמושכים ממנו שפכטל — וירדו אל הקרקעית כשהאגס נאסף בחזרה. קו המשווה של מערכת הפסים נטוי ב- 10° לפחות ביחס לקו המשווה של היום וחוצה אותו ליד הבסיס: ייתכן שציר כדור הארץ השתנה לאחר הניתוק, והסדרה משאירה זאת לעבודה עתידית.

הטייטה הזו אוספת את התצפיות, את המדידות ומחקר אחד שנעשו עד כה (C.5). המחקרים שעוד ייעשו — ההתאמה של קו המשווה של הפסים, מבחן מקריות לכך שהבסיס נמצא על קו המשווה, הרציפות של הפסים מתחת לרכסים, והשוואה של רכסי השפכטל לרכסים שנבנו מלמטה במקומות אחרים בעולם — מפורטים בחלק G.

הטענה. הפסים של צפון האוקיינוס השקט הם הצד המוביל של האגס שעליו נבנה הירח: הם נמתחו בכיוון הסיבוב של כדור הארץ כל עוד האגס עמד, והתקפלו לפסים כשהוא נאסף בחזרה לתוך כדור הארץ. קצה האגס — המקום שבו נוצר הירח — נמצא ממערב לבסיס, בצד המאסף, והשאיר את קווי המתאר שלו בשני כיפופים של הפסים, בטביעת הראי של הצד הקרוב, ובשתי שרשראות רכסים שנמשכו כלפי מעלה באזור המגע במהלך ההתקלפות של הירח, כשנמשך החוצה בכוח. בקיצור, קרקעית צפון האוקיינוס השקט נקראת כמקום שבו האגס עמד ונאסף בחזרה, והפסים — כרשומה של חזרתו.

המספרים. הפסים משתרעים מ- 33.6° צפונית לקו המשווה של מערכת הפסים (Mendocino) עד 1.8° (Clipperton). בסיס האגס (Kiritimati, 1.9° צפון, 157.5° מערב) נמצא 1.6° מקו המשווה של המערכת, שנטוי ב- 10° לפחות ביחס לקו המשווה של היום (עד כ- 20° ; המיקומים במאמר הזה ניתנים להתאמה של 11° , עם חצייה ב- 159° מערב). הכיפופים: 23.8° צפון, 164.9° מזרח, ו- 5.3° דרום, 173.2° מזרח, במרחק 3,360 ק"מ זה מזה ($3,700-3,040$); המרכז ב- 9.3° צפון, 169.3° מזרח, כ-3,760 ק"מ ממערב לבסיס. הצד הקרוב על כדור הארץ, כתמונת ראי בהגדלה $1.37\times$: Imbrium ב- 13.19° צפון, 179.04° מזרח; Serenitatis בערך ב- 11.5° צפון, 166.3° מזרח; מרכז המגע בערך ב- 8.2° צפון, 179.3° מערב. שרשראות הרכסים רחוקות זו מזו 2,800–3,500 ק"מ. אורך גופו של האגס עצמו, עם אזור הקצה, בשחרור: 8,890–9,000 ק"מ; כשהירח נחשב לקצה האגס, האגס הגיע לקו הקורוטציה (10,570–10,690 ק"מ); מערכת הפסים: 9,360 ק"מ (C.4). כשמשרטטים אותם על רשת GEBCO 2026, הפסים של הצפון, המרכז והדרום של האוקיינוס השקט מובילים אל הקצה: כל עשרת המסלולים המשורטטים מגיעים אל אזור הקצה, ושישה עוברים בטווח 1,500 ק"מ ממרכז המגע הסופי (166–1,274 ק"מ), מול אף אחד משלושה קווי ייחוס (C.5). בקריאה משולבת: הכיפופים ושרשראות הרכסים מודדים שניהם רוחב של כשלושת אלפים קילומטרים, הרוחב של המגע שעליו ישב הירח, והבסיס והשפה הדרומית של הקצה נמצאים על קו המשווה של הפסים.

מה הוא דורש. (1) אגס שהבסיס שלו על האוקיינוס השקט ליד Kiritimati והקצה שלו מפגר מערבה (מאמר 3). (2) צד מוביל שנמתח ואחר כך התקפל, בלי חיתוך מלמעלה. (3) ירח שפני השטח שלו היו גדולים בערך פי 1.37 כשישב על הקצה (צפיפות 1,300 לעומת 3,344 ק"ג/מ"ק). (4) אזור מגע בקצה שהחומר שלו עוד היה רך כשהירח התקלף ונמשך החוצה בכוח, כך שנמשך לרכסים; הרכסים ירדו אל קרקעית האוקיינוס השקט יחד עם אזור הקצה כשהאגס נאסף בחזרה. (5) קרקעית שצברה שכבות חדשות מלמעלה בזמן שהשכבות שמתחתן התחדשו: פני השטח המתוארכים הם השכבה האחרונה, והפסים הם קפל ישן יותר שמתחתיה (חלק F).

מבחנים. הדרישות של המודל, ומה שיבחן אותן, מרוכזים במאמר 11 (הדרישות).

מפות. גרדיאנט הכבידה האנכי (VGG) והטופוגרפיה של קרקעית האוקיינוס, Scripps / EarthByte, בתצוגה על גלובוס תלת-ממדי (Cesium); התמונות הן של המחבר. הטופוגרפיה מראה את הגובה של הקרקעית. ה-VGG מראה כמה מהר משיכת הכבידה משתנה כשנעים למעלה או למטה: הוא חזק במקום שבו חומר צפוף יותר וחומר קל יותר נפגשים לאורך מרחק קצר, והוא מחליש הבדלים רחבים ועמוקים. לכן קפל, רכס או שקע צר — על פני השטח או קבור מתחת לחומר צעיר יותר — מופיע בו כקו חד (חלק F). המיקומים נקראים על הגלובוס לאחר התאמת הפרספקטיבה שלו לקצה הדיסקה ולנקודות ידועות (Hawaii, הכיפוף Hawaii-Emperor, הקצה הצפוני של תעלת Tonga, הר הים Meiji; שאריות של פחות

מ-5 פיקסלים): מקומות שהקואורדינטות שלהם ידועות שימשו לכיול התצוגה, ולאחר ההתאמה כל אחד מהם נופל בטווח של 5 פיקסלים מן המקום שבו הגלובוס מראה אותו. **קו המשווה של הפסים.** בהתאמה על הנקודות של המחבר: נטוי ב- 10° לפחות ביחס לקו המשווה של היום, עד כ- 20° (E.2); המיקומים במאמר הזה ניתנים להתאמה של 11° , החוצה את קו המשווה של היום ב- 159° מערב, בתוך הטווח הזה; הערך המדויק הוא מחקר 1. **האגס** (מאמר 3): בסיס ברוחב של 9,000–11,000 ק"מ ליד Kiritimati, מעל האזור האיטי הגדול במעטפת התחתונה של האוקיינוס השקט (LLVP) — אזור בגודל של יבשת בתחתית המעטפת, ממש מעל ליבת כדור הארץ, שגלים סייסמיים עוברים בו לאט יותר מאשר במעטפת שסביבו; המגע עם הירח: 3,000 ק"מ בשחרור, 6,000 ק"מ קודם לכן; הכיפה: 3,650 ק"מ. **הירח:** צפיפות הגוף שעל הקצה 1,300 ק"ג/מ"ק; בשחרור 2,600 (רדיוס 1,890 ק"מ); היום 3,344 (רדיוס 1,737 ק"מ). על הקצה הגוף היה קל ומלא בגזים מן החומרים הנדיפים שלו; הוא נעשה צפוף יותר בעודו מחובר, ובשחרור היה עגול, עם קליפה חיצונית קשיחה (מאמר 2, B.7§). כל המיקומים על כדור הארץ הם המיקומים של היום.

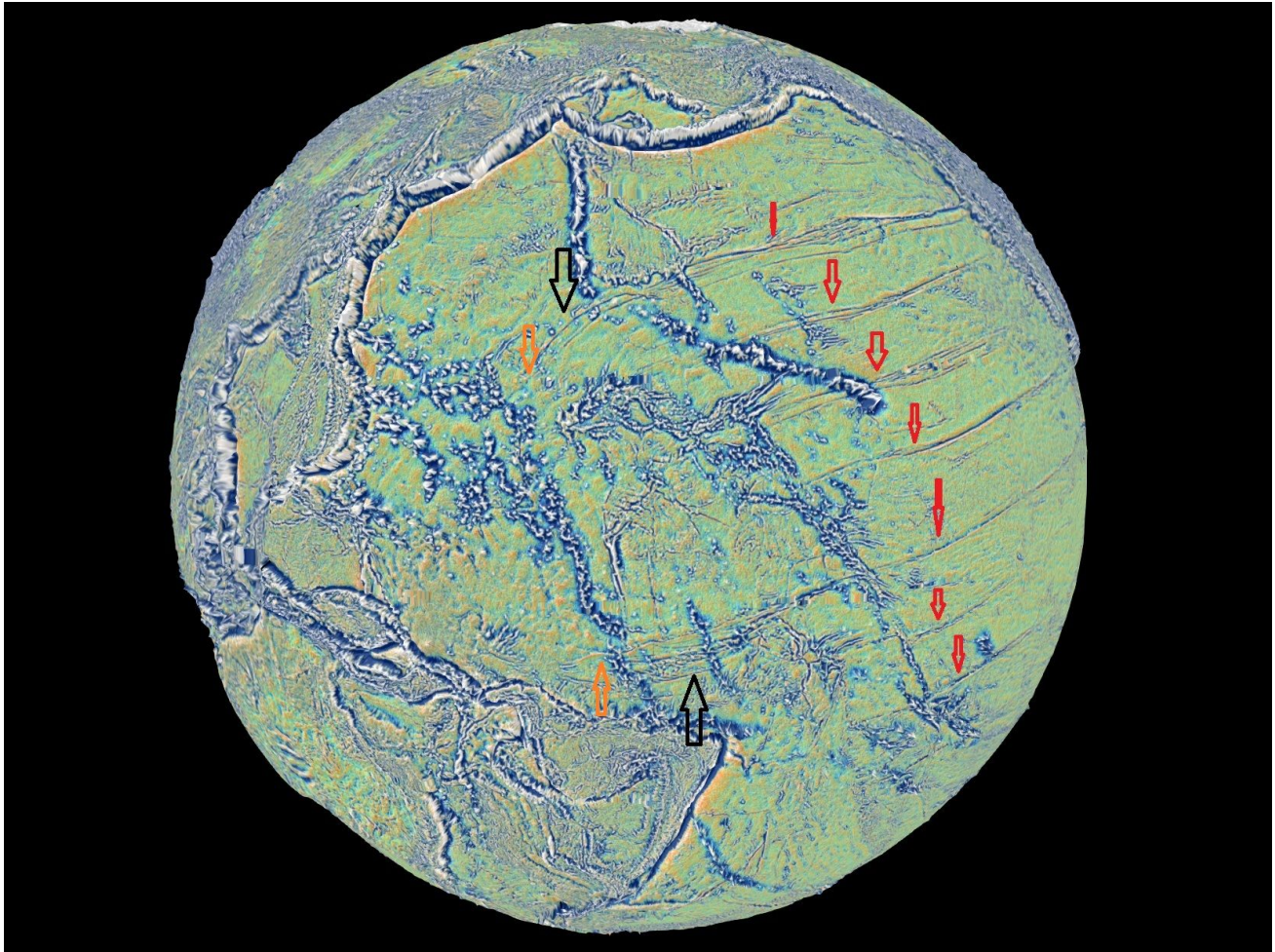
חלק A — מבוא: הפסים

החלק הזה מציג את נושא המאמר — מערכת של קווים ישרים על קרקעית צפון האוקיינוס השקט — ואת הקריאה שהסדרה נותנת להם. סעיף A.1 מתאר את מה שנראה במפות ומודד היכן נמצא כל פס; סעיף A.2 מזכיר את האגס של מאמר 3 ומנסח כיצד הפסים נקראים כצד המוביל שלו. התצפיות שתומכות בקריאה הזו באות בחלק B.

A.1 מה שנראה

לרוחב קרקעית צפון האוקיינוס השקט עוברים קווים ארוכים וישרים. הם נראים הכי טוב במפות של גרדיאנט הכבידה, שבהן הם בולטים כנתיבים חדים וצרים, ורבים מהם כפולים או משולשים — פס אחד מופיע כשניים או שלושה נתיבים קרובים זה לצד זה (איור A.1). משתמשים במפת גרדיאנט הכבידה משום שהיא מגיבה לניגודי צפיפות חדים לאורך מרחקים קצרים: במקום שבו קפל מציב חומר צפוף יותר לצד חומר קל יותר לאורך רצועה צרה, המפה משרטטת קו, בין שהרצועה נמצאת על פני השטח ובין שהיא נמצאת מתחת לשכבות צעירות יותר. בטופוגרפיה של אותה קרקעית הפסים חלשים (חלק F). הם משתרעים מחוף צפון אמריקה מערבה לאורך אלפי קילומטרים — Clipperton לבדו לאורך כ-7,240 ק"מ, יותר מרדיוס כדור הארץ — והם כמעט מקבילים. כל השישה הם מקבילים של קו משווה אחד, שנטוי ב- 10° לפחות ביחס לקו המשווה של היום (חלק E).

את המשמעות של "מקבילים של קו משווה אחד" רואים הכי טוב על גלובוס. כל מעגל גדול — מעגל שמחלק את הכדור לשני חצאים שווים — יכול לשמש קו משווה. המעגלים ששומרים על מרחק קבוע ממנו, צפונה או דרומה, הם המקבילים שלו, כמו שקווי הרוחב הם המקבילים של קו המשווה של היום. אם קו המשווה הזה נטוי ביחס לזה של היום, המקבילים שלו חוצים את המפה של היום באלכסון, אבל הם עדיין לעולם אינם נפגשים זה עם זה. מערכת של קווים ארוכים על כדור אינה חייבת להתנהג כך: קווים ישרים שנמתחו כל אחד בנפרד יהיו בדרך כלל חלקים של מעגלים גדולים שונים, וכל שני מעגלים גדולים נחתכים. שישה פסים שכולם מקבילים של אותו קו משווה, הפרוסים על פני יותר מ- 30° מצפון לדרום, אומרים משהו מוגדר: כל נקודה בגוף שמסתובב סביב ציר נעה לאורך מקביל של קו המשווה של אותו ציר, ולכן קווים מן הסוג הזה הם מה שתנועה אחת סביב ציר אחד משאירה אחריה. זו הסיבה שקו המשווה של הפסים נמדד במאמר הזה בקפידה (חלק E), וזו הסיבה שחשוב שבסיס האגס נמצא עליו (חלק B).



איור 1.A. האוקיינוס השקט על גלובוס גרדיאנט הכבידה. חיצים אדומים: הפסים. חיצים שחורים: המקומות שבהם הפס הצפוני מתכופף כלפי מטה והפס הדרומי מתכופף כלפי מעלה. חיצים כתומים: הנקודות שביניהן נמדד הקצה (חלק C). תמונה: המחבר.

האיור נותן את התמונה כולה במבט אחד. החיצים האדומים מסמנים את הפסים המקבילים שנמשכים לכיוון אמריקה; החיצים השחורים מסמנים את שני המקומות, ממערב לבסיס, שבהם הפסים החיצוניים ביותר עוזבים את המקבילים שלהם ופונים זה אל זה; החיצים הכתומים מסמנים את שתי הנקודות שהמרחק ביניהן נותן את רוחב הקצה בחלק C.

הטבלה מפרטת היכן נמצא כל פס. העמודה האמצעית נותנת את המרחק שלו, במעלות, צפונית לקו המשווה של מערכת הפסים; העמודה האחרונה נותנת את המרחק שלו צפונית למקביל שעליו נמצא בסיס האגס, כלומר העמודה האמצעית פחות 1.6° של הבסיס.

פס	מקו המשווה של המערכת	מרחק מן הבסיס
Mendocino	צפון 33.6°	צפונה 32.0°
Pioneer	צפון 30.1°	28.5°
Murray	צפון 25.9°	24.3°
Molokai	צפון 20.4°	18.8°
Clarion	צפון 10.5°	8.9°
Clipperton	צפון 1.8°	0.2°
בסיס האגס (Kiritimati)	1.6°	—

נמדד מנקודות עיגון על כל פס (Cape Mendocino, איי Channel, Molokai, והאיים Clarion ו-Clipperton); הקצה המערבי של Clipperton נותן 0.8° .

שני דברים בולטים בטבלה. הפסים פרוסים מן הבסיס צפונה על פני יותר משלושים מעלות, והדרומי שבהם, Clipperton, עובר במרחק של שבר מעלה מן הבסיס: הבסיס נמצא על קו המשווה של המערכת כולה, לצד הדרומי מבין ששת הפסים האלה; שני פסים נוספים נמצאים מדרום לו (B.4), כך שהבסיס נמצא בתוך המערכת ולא בשוליה. כשמודדים בנקודה אחרת — הקצה המערבי של Clipperton — הקריאה משתנה בכמעלה אחת, וזה נותן מושג על הדיוק של קריאה בנקודת עיגון אחת בשלב הזה; ההתאמה המלאה מחדש היא מחקר 1 (חלק G).

A.2 הקריאה של הסדרה

השאלה שהסעיף הזה עונה עליה היא כיצד מערכת של קווים על קרקעית האוקיינוס השקט קשורה למוצא הירח. הקשר הוא האגס של מאמר 3, שנוכיר כאן בקצרה.

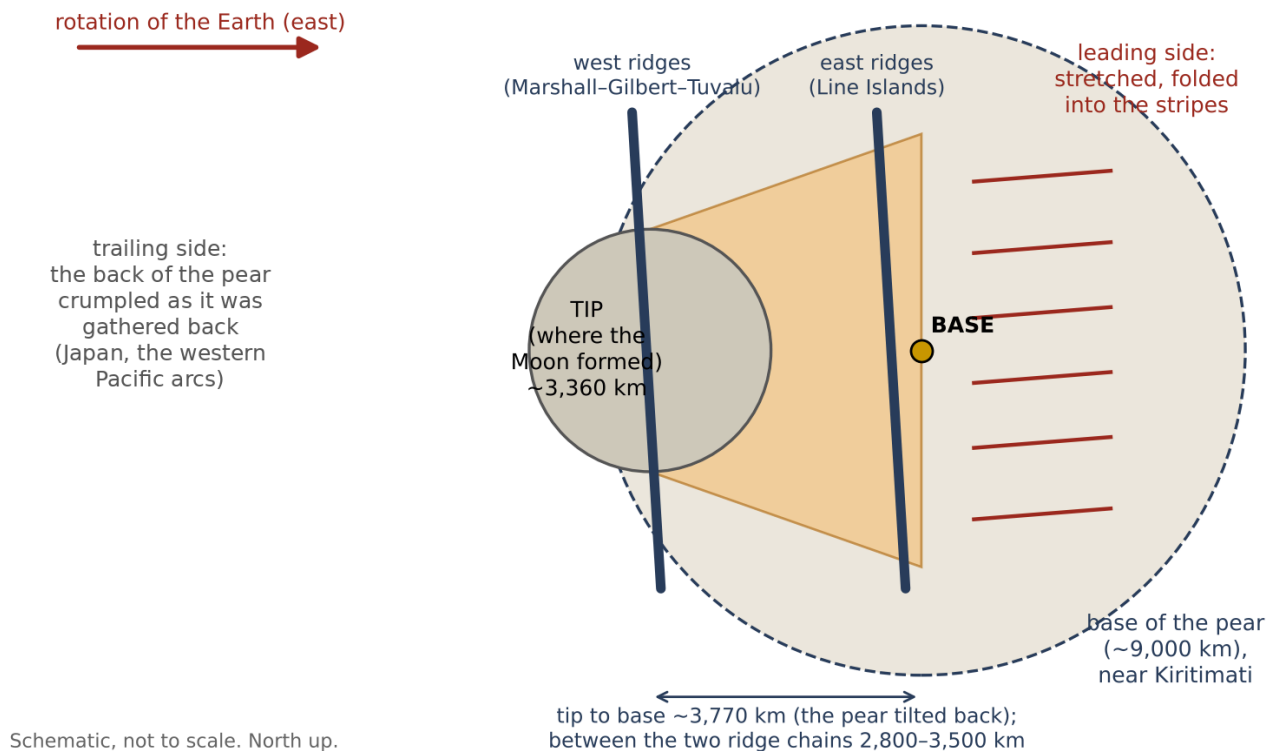
בסדרה הזו הירח נבנה מחומרו של כדור הארץ עצמו, על קצה של אגס שעלה מכדור הארץ בזמן שהסתובב מהר, ושנאסף בחזרה לתוך כדור הארץ אחרי שהירח נותק (מאמר 3). האגס היה בליטה אחת של כדור הארץ הצעיר, שנמשכה על ידי הלחץ שבתוכה לשלוחה ארוכה של חומרו של כדור הארץ עצמו: רחבה בבסיס שלה על פני כדור הארץ, ומצטרת בעקומה חלקה אחת אל הקצה שלה, שנשא את הגוף שהפך לירח. הירח ישב על הקצה על פני מגע רחב, ברוחב $6,000$ ק"מ בתחילה ו- $3,000$ ק"מ בשחרור, והכיפה העליונה שלו התרוממה כ- $3,650$ ק"מ מעליו. האגס היה חלק מכדור הארץ והוחזק בכבידה של כדור הארץ, כמו כל חלק אחר שלו; הוא לא נזרק, משום שמהירותו לא הייתה מהירות זריקה והוא היה בתוך רדיוס הקורוטציה — המרחק — כ- $16,400$ ק"מ ממרכז כדור הארץ על קו המשווה של אותה עת — שבו גוף שמסתובב עם כדור הארץ פעם ביממה כבר נע במהירות של מסלול חופשי. כשמרכז הירח הגיע למרחק הזה, הירח התחיל להיפרד; הוא התקלף בהתנגדות מועטה והשתחרר כ- 210 ק"מ מעבר לקו, כשמעט יותר ממחציתו כבר עברה אותו, נמשך החוצה בכוח. אנו מציעים שניתוק הירח חשף את פתחי האגס — הפקק יצא — והלחץ שבתוכו השתחרר; כשלא נשאר מה שיאריך אותו, האגס נאסף בחזרה לתוך כדור הארץ בהתמיינות, לאורך עשרות עד מאות מיליוני שנים.

בסיס האגס עמד על האוקיינוס השקט ליד Kiritimati (Christmas Island, בקבוצת Line Islands), מעל האזור האיטי הגדול במעטפת התחתונה (LLVP) של האוקיינוס השקט (מאמר 3, E.4§). אזור איטי גדול במעטפת התחתונה הוא אזור בתחתית המעטפת שבו גלים סייסמיים עוברים לאט יותר מאשר במעטפת שסביבו, וזה מראה שהחומר שלו שונה בטמפרטורה או בהרכב; יש שניים כאלה בגודל של יבשת, אחד מתחת לאפריקה ואחד מתחת לאוקיינוס השקט. אנו מציעים שהאזור שמתחת לאוקיינוס השקט הוא בחלקו המקום שבו החומר הכבד של האגס בא לנוח כשהאגס נאסף בחזרה — בהסתייגות קלה, משום שטבעם של האזורים העמוקים עדיין פתוח: ייתכן שהאזור של האוקיינוס השקט הוא בחלקו חומר הקשור לליבה שלא סיים להתמייין.

האגס כולו נטה לאחור: הקצה שלו, והירח שעליו, פיגרו אחרי הסיבוב של כדור הארץ. התמונה היומיומית היא ילדה שהולכת החוצה על קרוסלה מסתובבת: ככל שהיא מתרחקת מן המרכז, היא צריכה לנוע מהר יותר כדי לעמוד בקצב של הקרוסלה, והיא מרגישה שהיא נדחפת לאחור, נגד כיוון הסיבוב. חומר שנישא החוצה לאורך האגס פיגר באותה דרך, ולכן הקצה הגיע לעמוד מאחורי הבסיס — ממערב לו, משום שכדור הארץ מסתובב מזרחה. כך יש לאגס שני צדדים. החזית שלו, הצד הפונה אל הסיבוב — הצד המוביל, במזרח — נמתחה. הגב שלו, הצד הפונה הרחק מן הסיבוב — הצד המאסף, במערב — שכב מתחת לקצה הנוטה.

כשהאגס נאסף בחזרה, הוא נבלע בכדור הארץ; החלק הכבד שלו ירד אל תחתית המעטפת מתחת לבסיס האגס, והבליעה השאירה קמטים על הקרקעית — הפסים בצד המוביל, והקשתות המקומטות של מערב האוקיינוס השקט בגב (B.8, E.3). המסה לא עזבה את כדור הארץ; היא עברה מגבוה בחוץ אל עמוק בפנים.

בחזרה הזו הדופן המובילה שלו נמרחה לאורך הקרקעית בכיוון הסיבוב: הקצה הרחוק של הדופן פיגר יותר מכול והאמצע שלה פחות, כך שהדופן התקפלה לאחור על עצמה, והיא הונחה כפסים. המאמר הזה קורא את הפסים של צפון האוקיינוס השקט כאותה דופן.



איור 2.A. הקריאה של המאמר הזה, במבט מלמעלה. בסיס האגס ליד Kiritimati; הקצה, המקום שבו נוצר הירח, מפגר מערבה; הצד המוביל במזרח, מקופל לפסים; בצד המאסף, גב האגס, שהתקמט כשהאגס נאסף בחזרה (B.8); שרשראות הרכסים (חלק D). סכמטי.

איור 2.A פורש את המפה ששאר המאמר ממלא: הבסיס באמצע, הקצה ממערב לו, הצד המוביל המקופל ממזרח לו, ושרשראות הרכסים משני צדי המקום של הקצה.

אם הקריאה הזו נכונה, הקרקעית אמורה לשמור יותר מן הפסים. במקום שבו הקצה ירד, היא אמורה להראות את קווי המתאר של הקצה, ברוחב בערך של המגע; ובתוך קווי המתאר האלה היא עשויה לשמור את הטביעה של הפנים של הירח שנחו על הקצה — הצד הקרוב, הצד שעדיין פונה אל כדור הארץ. שני פנים שנלחצו זה אל זה משאירים תמונות ראי זה של זה, כמו שחותם משאיר טביעה הפוכה בשעווה: במבט מכדור הארץ, המזרח של הצד הקרוב של הירח נופל על המערב של הקרקעית שמתחתיו, ואילו הצפון נשאר צפון. ומשום שהירח היה אז הרבה פחות צפוף מהיום, הטביעה אמורה להיות גדולה מן הצד הקרוב של היום, ביחס 1.37 שבו האורכים של הירח התכווצו מאז (חלק C).

המאמר מתקדם כך. חלק B פורש את התצפיות: קו המשווה המשותף, הבסיס שעליו, הפסים שנמשכים מזרחה, הפסים שעוברים מתחת לרכסים, המעטפת העמוקה שמתחת לבסיס, והצד המאסף המקומט. חלק C מאתר את הקצה מתוך שני הכיפופים, בוחן את טביעת הראי של הצד הקרוב, ועוקב בנתונים אחר הפסים של האוקיינוס השקט כולו אל הקצה (C.5). חלק D קורא את שרשראות הרכסים שבתוך הקצה כרכסים שנמשכו כלפי מעלה בחלקו שהתקלף במהלך ההתקלפות של הירח, כשנמשך החוצה בכוח. חלק E מודד את הנטייה של קו המשווה של הפסים ביחס לזה של היום. חלק F עוסק באתגרים, ובראשם הגיל הצעיר של קרקעית האוקיינוס; חלק G מפרט את המחקרים שיבחנו את הקריאה, וחלק H מסכם.

חלק B — התצפיות

חלק A הציג את הקריאה של מאמר זה: הפסים הארוכים והישרים של צפון האוקיינוס השקט הם הקיר המוביל של האגס שעליו נבנה הירח, שהונח על הקרקעית כשהאגס נאסף בחזרה לתוך כדור הארץ אחרי השחרור. חלק זה עובר על מה שנראה במפה, תצפית אחר תצפית. לכל סעיף אותם שני שלבים. תחת **נצפה** אנו מציינים רק את מה שהמפה מראה, במונחים של המפה. תחת **המודל** אנו אומרים מדוע הקריאה של הסדרה מצפה בדיוק לכך. כך יכול הקורא לשפוט כל תצפית לעצמה לפני שהוא שופט את הקריאה הנבנית עליה.

B.1 הפסים הם מקבילים של קו משווה אחד

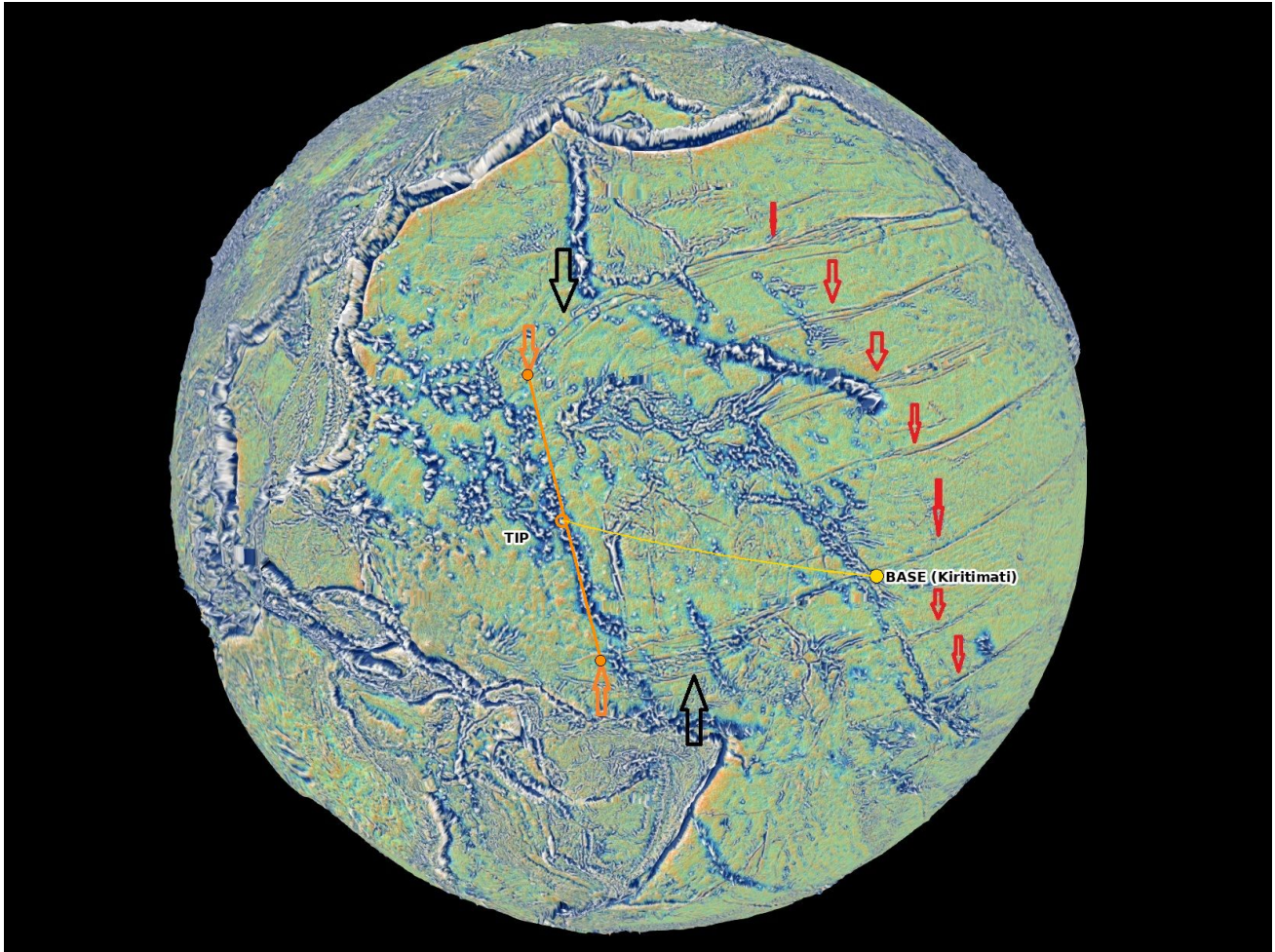
נצפה. שישה פסים מקבילים לקו משווה אחד, מ- 33.6° צפונה ממנו עד 1.8° (A.1), ועוד שניים מדרום לו (B.4) — חגורה סביב קו משווה אחד. במילים פשוטות: אם מטים גלובוס עד שמעגל גדול מסוים אחד נעשה לקו המשווה שלו, כל פס עוקב אז אחר קו של קו רוחב קבוע על הגלובוס המוטה, כפי שהמקבילים במפה רגילה עוקבים אחר קווים של קו רוחב קבוע. ששת הפסים שוכנים במרחקים שונים מקו המשווה הזה, אך אף אחד מהם אינו חוצה אחר, ויחד הם יוצרים רצועה משני צדיו.

המודל. זהו כיוון המתיחה של הצד המוביל: הפסים מקבילים לתנועת חזית האגס ביחס לקרקעית, וקו המשווה שלהם הוא קו המשווה של הסיבוב שמתח אותם — קו המשווה של כדור הארץ באותה עת (חלק E). הסיבה פשוטה. כל נקודה בגוף מסתובב נעה לאורך מקביל של קו המשווה שלו. קיר העומד על כדור הארץ ונישא בסיבובו נמשך לאורך המקבילים האלה, וכשהונח, גם הסימנים שהשאיר נמשכים לאורכם. מערכת קווים שכולם חולקים קו משווה אחד היא מה שסיבוב משאיר; לקווים שנוצרו בידי סיבות מקומיות שאינן קשורות זו לזו לא הייתה סיבה לחלוק קו משווה אחד.

B.2 בסיס האגס שוכן על קו המשווה של מערכת הפסים

נצפה. Kiritimati, בסיס האגס במאמר 3, שוכן על קו המשווה של הפסים (1.6° ממנו), ליד Clipperton (1.8°). מקום הבסיס נקבע במאמר 3, מן המעטפת העמוקה שמתחתיו, לפני שהפסים נשקלו; קו המשווה של הפסים הותאם לפסים בלבד. העובדה ששניהם נפגשים היא אפוא ממצא, לא בחירה. באיזו תדירות נקודה שנבחרה באקראי הייתה נופלת קרוב כל כך לקו המשווה של המערכת — זה נושא של מחקר 2 (חלק G).

המודל. האגס עלה מקו המשווה של אותה עת; בסיסו הוא המקום שבו התרכזה המתיחה, והפסים מסודרים סביבו. גוף העולה מכוכב לכת מסתובב ונמשך החוצה בידי הסיבוב עולה ביתר קלות היכן שהמשיכה החוצה של הסיבוב גדולה ביותר, כלומר בקו המשווה. אם הפסים רושמים את קו המשווה של אותה עת (B.1), בסיס האגס צריך לשכון על אותו קו עצמו, והוא אכן שוכן עליו.



איור B.1. הגאומטריה על מפת המחבר. צהוב: בסיס האגס (Kiritimati) והקו מן הבסיס אל מרכז הקצה. כתום: הקצה, בין שני הכיפופים (C.1), ומרכזו. האיור מרכז במבט אחד את הרכיבים הנמדדים בחלקים B ו-C: הבסיס על קו המשווה של הפסים, הפסים הנמשכים מזרחה ממנו, והקצה השוכן מערבה ממנו, בין שני הכיפופים.

B.3 הפסים נמשכים מזרחה מן הבסיס

נצפה. הפסים נמשכים מאזור הבסיס מזרחה עד אמריקה; מערבה מן הבסיס הם מתכופפים ומתכנסים (B.6). הם חד-צדדיים: הם מתחילים ליד הבסיס ואינם ממשיכים כמקבילים ישרים בצדו המערבי.

המודל. המזרח הוא כיוון סיבובו של כדור הארץ: הצד המוביל. כדור הארץ מסתובב ממערב למזרח, ולכן צד האגס שפנה מזרחה היה הצד שנדחף קדימה אל תוך הסיבוב, והצד שפנה מערבה היה גבו. הצד המאסף, במערב, הונח באופן אחר — לעבר הקשתות של מערב האוקיינוס השקט ויפן, בגב האגס (B.8). קיר שנמתח בכיוון הסיבוב צריך להשאיר את פסיו בצד המזרחי של הבסיס בלבד, וסימן מסוג אחר בצד המערבי. מחקר 3 (חלק G) בודק מה שוכן מערבה מן הבסיס.

B.4 פסים משני צדי הבסיס

נצפה. הפסים מ-Mendocino עד Clipperton שוכנים מצפון לבסיס; שניים נוספים שוכנים מדרום לו, כ- 6° וכ- 14° מדרום לקו המשווה של המערכת (עדיין לזיהוי; כנראה הפסים המוכרים בשמות Galapagos ו-Marquesas). השמות משמשים כאן רק כשמות של מקומות במפה.

המודל. החזית נמתחה משני צדי הבסיס; הבסיס שוכן בתוך המערכת, לא בקצה שלה. חזית האגס הייתה קיר רחב — רוחב בסיסו היה 9,000–11,000 ק"מ — וכל רוחבו של הקיר הזה פנה אל הסיבוב. לכן צפויים פסים

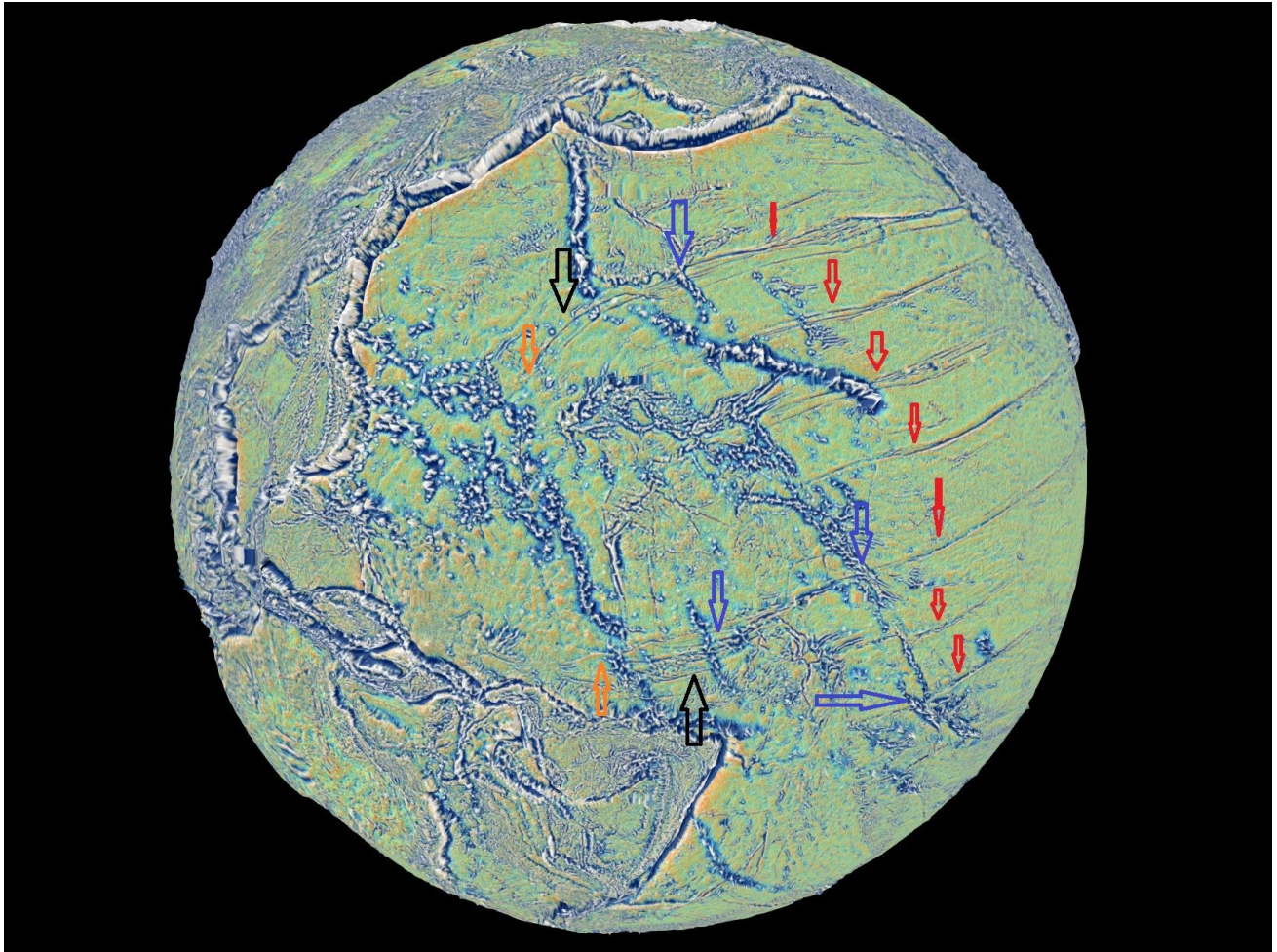
מצפון לבסיס ומדרום לו, והבסיס ביניהם ולא בקצה אחד. הפסים הצפוניים נראים טוב יותר ונמדדו טוב יותר; את שני הדרומיים עוד יש לעקוב במלואם (מחקר 1).

B.5 הפסים עוברים מתחת לרכסים

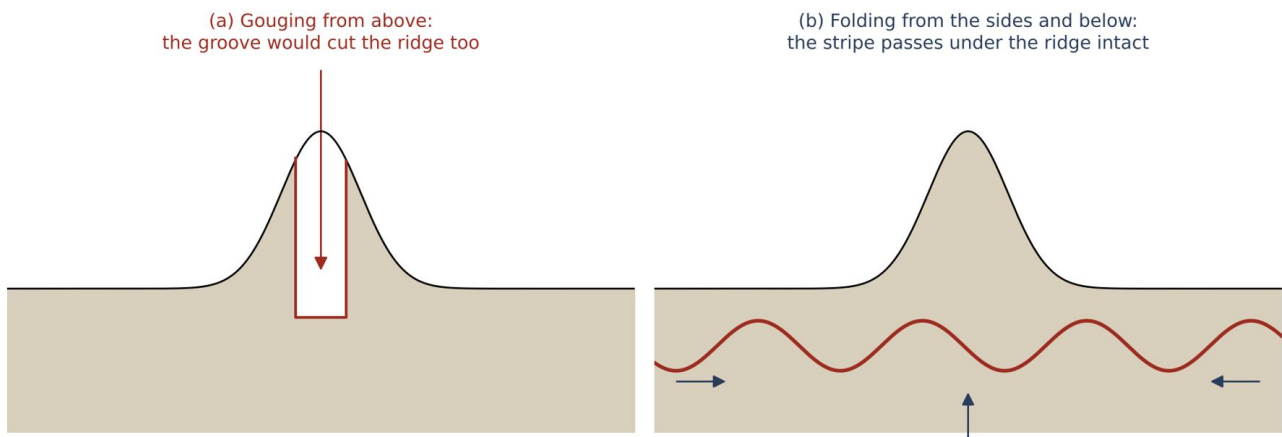
נצפה. היכן שרכסים געשיים חוצים את הפסים — ליד 36° צפון 178° מערב, באי Line ליד 6° צפון 159° מערב, ליד אי Phoenix ב- 2° דרום 175° מערב וליד 13° דרום 152° מערב — הפס ממשיך מתחת לרכס, והרכס אינו נחתך (איור B.2). בארבע חציות נפרדות, בחלקים שונים של המערכת, הפס פוגש רכס, נעלם מתחתיו ומופיע שוב בצדו האחר, בעוד הרכס שמעליו עומד שלם.

המודל. הפסים נוצרו בקיפול מן הצדדים ומלמטה, לא בחריצה מלמעלה: חריץ שנחתך מלמעלה היה חותך גם את הרכס (איור B.3). את ההבדל בין השניים קל לדמיין. העבירו סכין לרוחבה של מפת שולחן שספר מונח עליה: הסכין פוגשת קודם את הספר, ואז שהיא חותכת אותו או שהוא עוצר אותה — הקו על המפה נקטע היכן שהספר עומד. עכשיו דחפו את המפה משני שוליה כך שתתקמט לקפל: הקפל נוצר בבד עצמו, מתחת לספר, והספר נישא עליו שלם. פס שנחתך מלמעלה, בידי משהו שנגרר על הקרקעית, היה צריך לחתוך כל רכס שבדרכו, או להסתיים מולו. פס שנוצר בקיפול הקרקעית עצמה, מן הצדדים ומלמטה, עובר מתחת לרכס ומשאיר אותו שלם. ארבע החציות מראות את האפשרות השנייה.

התצפית אינה קובעת את הסדר: ייתכן שהרכסים כבר עמדו על המשטח המתוח בזמן שהקיפול נוצר מתחתם. המבחן הוא אם הרכסים עצמם מקוצרים היכן שפס עובר מתחתם (חלק G). קפל שנוצר מתחת לרכס עומד היה דוחס את הקרקע שעליה עמד הרכס, והרכס היה צריך להראות זאת, כשם שהספר שעל מפת השולחן המקומטת בא לשכב על רצועת בד צרה יותר. זהו מחקר 6, והשאלה מרוכזת גם ב-F.2.



איור B.2. חצים כחולים: מקומות שבהם הפסים עוברים מתחת לרכסים. תמונה: המחבר. בכל חץ, עקבו אחר הפס עד הרכס ואל צדו הרחוק: הפס ממשיך, והרכס אינו שבור במקום שבו הפס פוגש אותו.



איור B.3. (a) חריץ שנחתך מלמעלה היה חותך את הרכס שהוא חוצה. (b) קפל שנוצר מן הצדדים ומלמטה עובר מתחת לרכס ומשאיר אותו שלם. שני הלוחות מראים את שתי הדרכים שבהן אפשר ליצור קו ארוך וישר על קרקעית שכבר נושאת רכס. רק השנייה מתיישבת עם ארבע החציות של איור B.2.

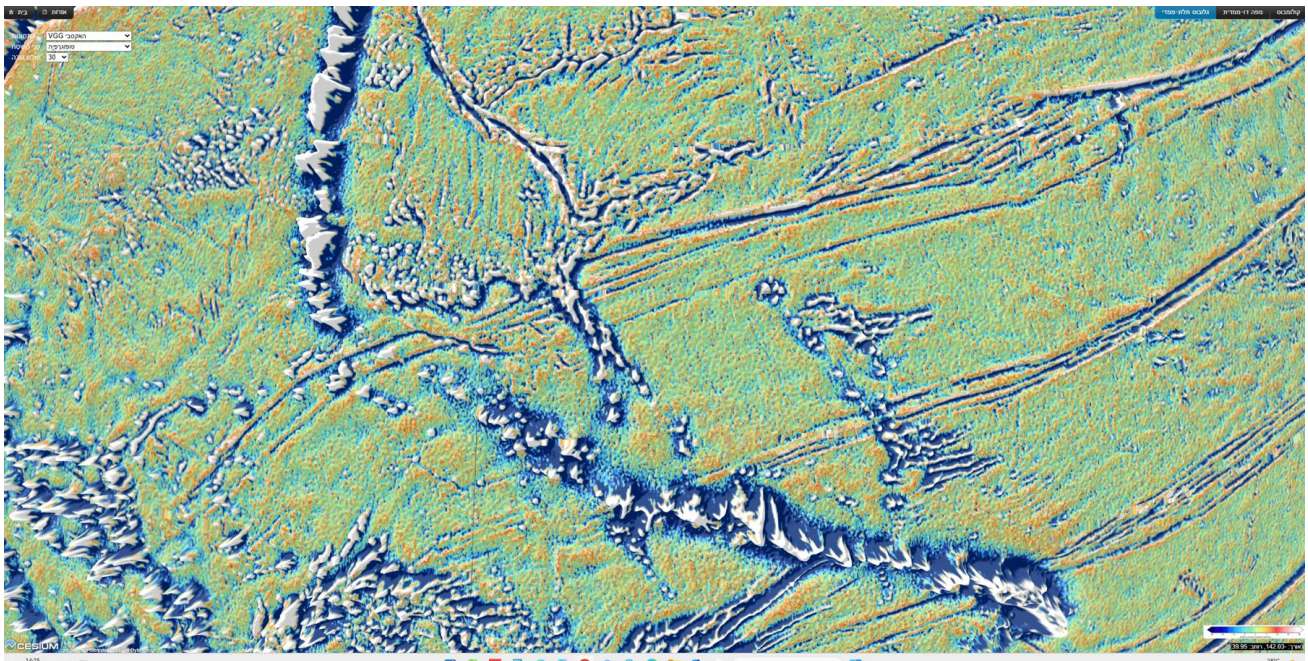
B.6 רציפות וכיפוף ברכסים — קריאה ראשונה

נצפה. במבטים קרובים על שתי חציות (איורים B.4–B.5) כל פס מגיע אל הרכס וממשיך בצדו האחר מאותה נקודה, בלי קפיצה הצידה שאפשר לראות ברזולוציה הזאת; אבל כיוונו משתנה ברכס. מערבה מן הרכסים הפס הצפוני פונה מטה (כ-14° בתמונה, ובקשת צפונה יותר) והפס הדרומי פונה מעלה (כ-8°). הפסים מתכנסים

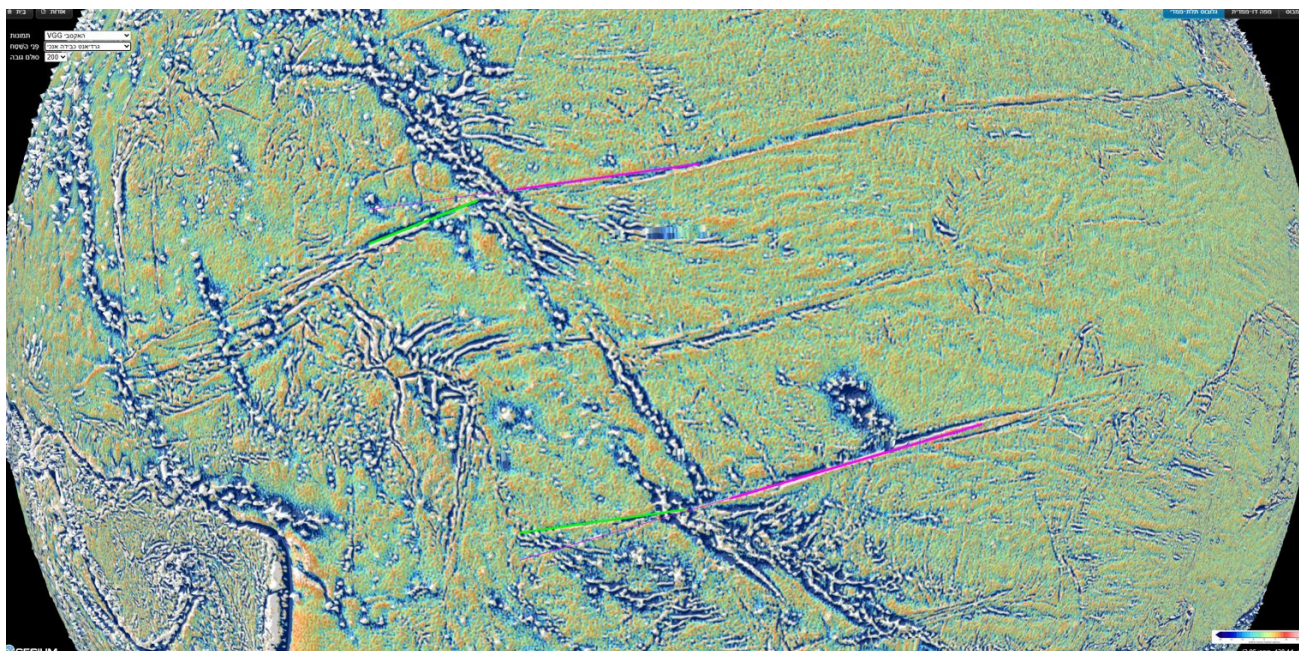
מערבה — לעבר הקצה (חלק C). מקבילים של קו משווה אחד אינם מתכנסים: מערבה מן הרכסים הפסים יוצאים מן הגאומטריה הזאת. במילים אחרות, מזרחה מן הרכסים הפסים מתנהגים כקווי רוחב סביב קו משווה אחד (B.1); מערבה מהם, הפסים החיצוניים פונים זה אל זה, הצפוני דרומה והדרומי צפונה, כאילו נמשכים אל אזור משותף ביניהם.

המודל. ההתכנסות מצביעה על האזור שבו ירד קצה האגס (חלק C). הפסים הם עקבות הקיר המוביל; היכן שהקצה שכב, הקיר נאסף סביבו, והפסים פונים לעברו. כשמשרטטים אותם בנתונים לרוחב האוקיינוס השקט כולו, הפסים של הצפון, המרכז והדרום מובילים אל אותו קצה (C.5).

מצב. קריאה ראשונה על מבטים אלכסוניים עם הגזמה אנכית (פי 30 ופי 200); יש למדוד אותה על מפה שטוחה ללא הגזמה (חלק G). המבטים האלה מסתכלים על הגלובוס בזווית, כמו מחלון של מטוס, ומכפילים את כל הגבהים — פי 30 במבט אחד ופי 200 באחר — כדי שתבליט נמוך על הקרקעית ייראה בכלל. שני הצעדים עוזרים לעין למצוא פס, ושניהם מעוותים את הזוויות שקוראים מן התמונה: במבט אלכסוני קו ישר על הגלובוס המעוגל יכול להיראות כפוף, ועל משטח מוגזם צלע של רכס יכולה לגרום לקו להיראות כאילו הוא פונה במקום שבו הוא רק מטפס. הזוויות של 14° ו- 8° הן אפוא זוויות בתמונה, לא על פני כדור הארץ. כדי למדוד את הכיוון האמיתי של כל פס משני צדי רכס, יש לקרוא את אותם מקומות על מפה שטוחה הנראית ישירות מלמעלה, עם גבהים בקנה מידה אמיתי, באמצעות הקואורדינטות של הסמן ולא בעין (מחקר 6).



איור B.4. מבט קרוב: הפסים הצפוניים מגיעים אל רכס וממשיכים מעבר לו, מתכופפים דרומה. תמונה: המחבר. עקבו אחר כל פס מימין לשמאל (ממזרח למערב): הוא שומר על מקומו לרוחב הרכס, אך עוזב אותו בכיוון חדש.



איור B.5. מבט קרוב על החצייה באי Line. מגנטה: הפס מזרחה מן הרכס; מקווקו: המשכו הישר; ירוק: הפס כפי שהוא נראה מערבה מן הרכס. תמונה: המחבר; עקבות: מאמר זה. הפער בין הקו המקווקו לקו הירוק הוא שינוי הכיוון ברכס: הפס אינו קופץ הצידה, אך מעבר לרכס הוא כבר אינו הולך במסלולו המזרחי.

B.7 המעטפת העמוקה מתחת לבסיס

נצפה. מתחת לבסיס המעטפת התחתונה ביותר איטית בכל חמשת המודלים של מפות ההצבעה (Cottaar & Lekic 2016), ובתוך קו המתאר של 1%– של שני מודלים נוספים; מרכז אזור המהירות הנמוכה של האוקיינוס השקט שוכן 1,480–1,660 ק"מ לדרום-דרום-מערב (מאמר 3, E.4§).

כמה מילים על המונחים האלה. גלים סייסמיים מרעידות אדמה חוצים את כדור הארץ כולו, ומזמני ההגעה שלהם בונים מפה של מהירות הגלים בכל עומק — "מודל טומוגרפי". היכן שהגלים נעים לאט מן הממוצע לאותו עומק, החומר חם יותר מסביבתו, או בעל הרכב שונה — צפוף יותר ועשיר יותר בברזל, למשל. מעל הליבה, מתחת לאוקיינוס השקט ומתחת לאפריקה, שוכנים שני אזורים גדולים של חומר איטי, אזורי המהירות הנמוכה הגדולים (LLVP — אזור איטי גדול במעטפת התחתונה). קבוצות מחקר שונות מודלים טומוגרפיים שונים, והמפות שלהן אינן מסכימות בכל פרט. "מפות ההצבעה" של Cottaar & Lekic (2016) מתמודדות עם זה בספירה: לכל מקום בבסיס המעטפת הן שואלות כמה מתוך חמישה מודלים מגדירים אותו כאיטי. מקום שקיבל את כל חמשת הקולות איטי בכל מודל. קו המתאר של 1%– הוא דרך אחרת, מחמירה יותר, לשרטט את אותם אזורים: זהו הקו שבתוכו הגלים איטיים מן הממוצע לאותו עומק באחוז אחד לפחות. מתחת ל-Kiritimati ההצבעה פה אחד, ושני מודלים נוספים ממקמים אותו גם בתוך קווי המתאר של 1%– שלהם. בסיס האגס עומד אפוא על האזור האיטי של האוקיינוס השקט, מעט לצפון-צפון-מזרח ממרכזו.

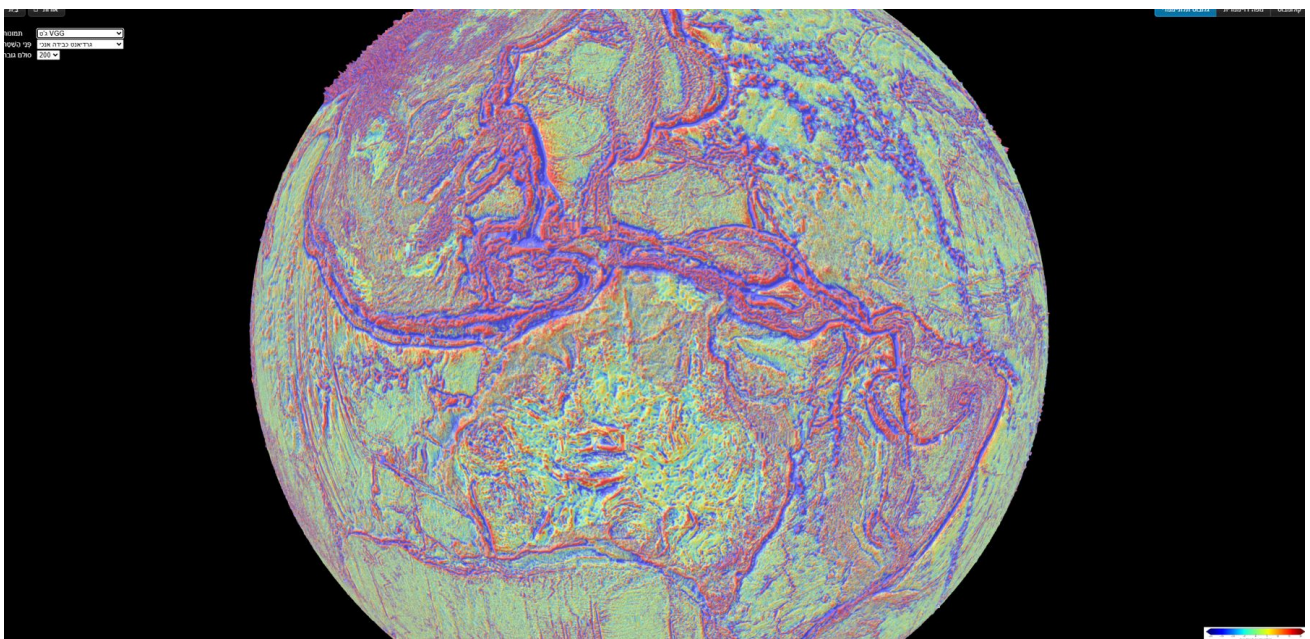
המודל. אחרי השחרור האגס נאסף בחזרה לתוך כדור הארץ שלם ונבלע בו (E.3); חלקו הכבד, העשיר בברזל, ירד אל תחתית המעטפת, מתחת למקום שבו עמד האגס. אנו מציעים, בהסתייגות קלה משום שטבעם של האזורים העמוקים עדיין פתוח, שערימה צפופה ועשירה בברזל שם היא חלק מאזור המהירות הנמוכה של האוקיינוס השקט (מאמר 3, E.4§). הפסים על הקרקעית והאזור האיטי בבסיס המעטפת הם אז שני עקבות של אותו אירוע: אחד למעלה, היכן שהקיר הונח, ואחד למטה, היכן שהחומר הכבד בא לנוח.

B.8 הצד המאסף — גב האגס

נצפה. מערבה מן הקצה, בין מערב האוקיינוס השקט לאוקיינוס ההודי, הקרקעית ושוליה מקומטים ומקולפים לכל כיוון: קשתות הפיליפינים ו-Mariana, הקשתות של אינדונזיה, קשת Banda המעוקלת כוו מצפון לאוסטרליה (איור B.6). מזרחה מן הבסיס הסימנים מקבילים וישרים (B.1); מערבה מן הקצה הם מעוקלים, צפופים ופונים לכיוונים רבים.

המודל. זהו גב האגס: הצד שפנה הרחק מן הסיבוב, שהתקמט בלי סדר כשהאגס נאסף בחזרה, בעוד הקיר המוביל שלו הונח בפסים מקבילים. ההבדל בין שני הצדדים נובע ממה שכל צד עבר בזמן שהאגס עמד. הקיר המוביל נמתח זמן רב בכיוון אחד, כיוון סיבובו של כדור הארץ; הוא נשא את הכיוון האחד הזה אל תוך חזרתו, ולכן הונח בקווים שכולם חולקים אותו. לגב לא הייתה משיכה יחידה כזאת. כשהאגס נאסף בחזרה ונבלע, הגב ירד בלי כיוון משלו, והתקמט כפי ששטיח מתקמט כשמפילים אותו בערימה במקום למשוך אותו ישר.

כשהמדידה נעשית מן הבסיס (Kiritimati), הקשתות שוכנות היכן שאורך האגס מגיע: קשת Banda ב-8,100 ק"מ, הפיליפינים Sulawesi- ב-9,040–9,070 ק"מ, Java ב-10,300 ק"מ — מול אגס שגופו שלו, עם אזור הקצה, היה באורך 8,890–9,000 ק"מ בשחרור (C.4). הגב עמד מתחת לקצה הנוטה, במערב. האגס נאסף בחזרה לאט; המסות שלו נספגו בכדור הארץ והותירו קמטים, ובגב הקמטים האלה הם הקשתות המקומטות. גב שהונח כך צריך להשאיר את עקבותיו עד כאורך אגס אחד מערבה מן הבסיס. הדימוי של עץ כרות, השוכב לאורך קטע קרקע השווה לגובהו, מראה רק את ההתאמה הזאת של האורכים: האגס לא הופל, הוא נאסף בחזרה. הקשתות שוכנות ב-8,100 עד 10,300 ק"מ, משני צדי האורך הזה.



איור B.6. הצד המאסף: הקשתות המקומטות של מערב האוקיינוס השקט ושל אינדונזיה, ואוסטרליה למטה. גרדיאנט הכבידה. תמונה: המחבר. השוו את המרקם של איור זה לזה של איור A.1: שם, קווים ארוכים ומקבילים; כאן, קשתות הדוקות הפונות לכל כיוון.

מה שיש בידינו עכשיו. הפסים יוצרים חגורה אחת סביב קו משווה אחד (B.1); בסיס האגס שוכן על קו המשווה הזה (B.2); הפסים שוכנים מזרחה מן הבסיס, בצד שפנה אל הסיבוב, ומשני צדיו, מצפון ומדרום (B.3–B.4); הם עוברים מתחת לרכסים, כפי שקפלים עושים וחרצים אינם עושים (B.5); מערבה מן הרכסים הם פונים זה אל זה (B.6); המעטפת העמוקה מתחת לבסיס איטית (B.7); וגב האגס, במערב, מקומט במרחק של כאורך אגס אחד מן הבסיס (B.8). החלק הבא עוקב אחר הפסים עד המקום שבו הם מתכנסים.

חלק C — קצה האגס: המקום שבו נוצר הירח

חלק B הסתיים היכן שהפסים פונים זה אל זה, מערבה מן הרכסים. חלק זה שואל מה שוכן באזור שאליו הם פונים. בסדרה זו הירח נבנה על קצה האגס, והקצה פיגר אחרי הסיבוב, מערבה מן הבסיס (מאמר 3). כשהאגס נאסף בחזרה לתוך כדור הארץ, הקצה ירד מערבה מן הבסיס. האזור שבו הפסים מתכנסים צריך להיות אפוא המקום שבו ירד הקצה: הוא צריך להיות רחב כמו הקצה, הוא צריך לשכון מערבה מן הבסיס, ואם פני הקצה שמרו סימן כלשהו של הירח שישב עליהם, הסימן הזה צריך להימצא בתוכו. הסעיפים שלהלן עוברים על שלושת אלה בזה אחר זה (C.1–C.3); C.4 משווה את אורכה של מערכת הפסים כולה לאורך האגס, ו-C.5 עוקב בנתונים אחר הפסים של האוקיינוס השקט כולו — צפון, מרכז ודרום — אל אותו קצה.

C.1 שני הכיפופים

מערבה מן הבסיס הפס הצפוני מתכופף מטה והפס הדרומי מתכופף מעלה (איור A.1, חצים שחורים). המרחק בין הכיפופים (חצים כתומים) הוא:

ערך	
הכיפוף הצפוני	צפון 164.9° מזרח 23.8°
הכיפוף הדרומי	דרום 173.2° מזרח 5.3°
מרחק	ק"מ (30.2°) 3,360
טווח (כל נקודה הוזה ב-15± פיקסלים)	ק"מ 3,040–3,700
מרכז	צפון 169.3° מזרח 9.3°

הטבלה נותנת את שני המקומות שבהם הפסים החיצוניים עוזבים את מסלולם הישר, את המרחק ביניהם לאורך פני כדור הארץ, ואת הנקודה שבאמצע הדרך ביניהם, שאותה אנו לוקחים כמרכז הקצה. הטווח בשורה הרביעית מראה עד כמה המרחק תלוי במקום המדויק שבו מסמנים את הכיפופים: כל כיפוף הוזז ב-15 פיקסלים על התמונה לכל כיוון, והמרחק נשאר בין 3,040 ל-3,700 ק"מ.

מדוע להשוות את המרחק הזה למגע ולכיפה? אם הפסים פונים משום שנאספו סביב הקצה כשירד, שני הכיפופים מסמנים את שני שולי הקצה, והמרחק ביניהם הוא רוחב הקצה. הרוחב הזה ידוע באופן בלתי תלוי, ממאמר 3: הירח ישב על מגע ברוחב 3,000 ק"מ בשחרור, והכיפה שעליה ישב הייתה ברוחב 3,650 ק"מ. הרוחב מתאים למגע שעליו ישב הירח בשחרור, 3,000 ק"מ, ולכיפה שמעליו, 3,650 ק"מ (מאמר 3). 3,360 הק"מ שנמדדו שוכנים בין השניים, והטווח שלהם, 3,040 עד 3,700 ק"מ, מכסה את שניהם.

הכיפוף הצפוני שוכן על המקביל של Pioneer (30.0° צפונה מקו המשווה של מערכת הפסים, לעומת 30.1°); הכיפוף הדרומי — על קו המשווה של המערכת עצמו (0.1° ממנו), כמו הבסיס (1.6°). הכיפופים אינם ממוקמים אפוא באקראי בין הפסים: כל אחד נופל על קו של המערכת עצמה, אחד על פס ואחד על קו המשווה שעליו שוכן גם הבסיס.

C.2 הקצה שוכן מערבה מן הבסיס

מרכז הקצה שוכן כ-3,760 ק"מ מערבה מן הבסיס (3,770 ק"מ בגרסה קודמת): בצד המאסף. האגס נטה לאחור — הקצה והירח שעליו פיגרו אחרי סיבוב כדור הארץ — וכשנאסף בחזרה, הקצה ירד מערבה מן הבסיס. הקצה עמד גבוה מעל פני השטח והיה צריך להינשא סביב על מעגל גדול בהרבה מזה של הבסיס; בסדרה הוא פיגר

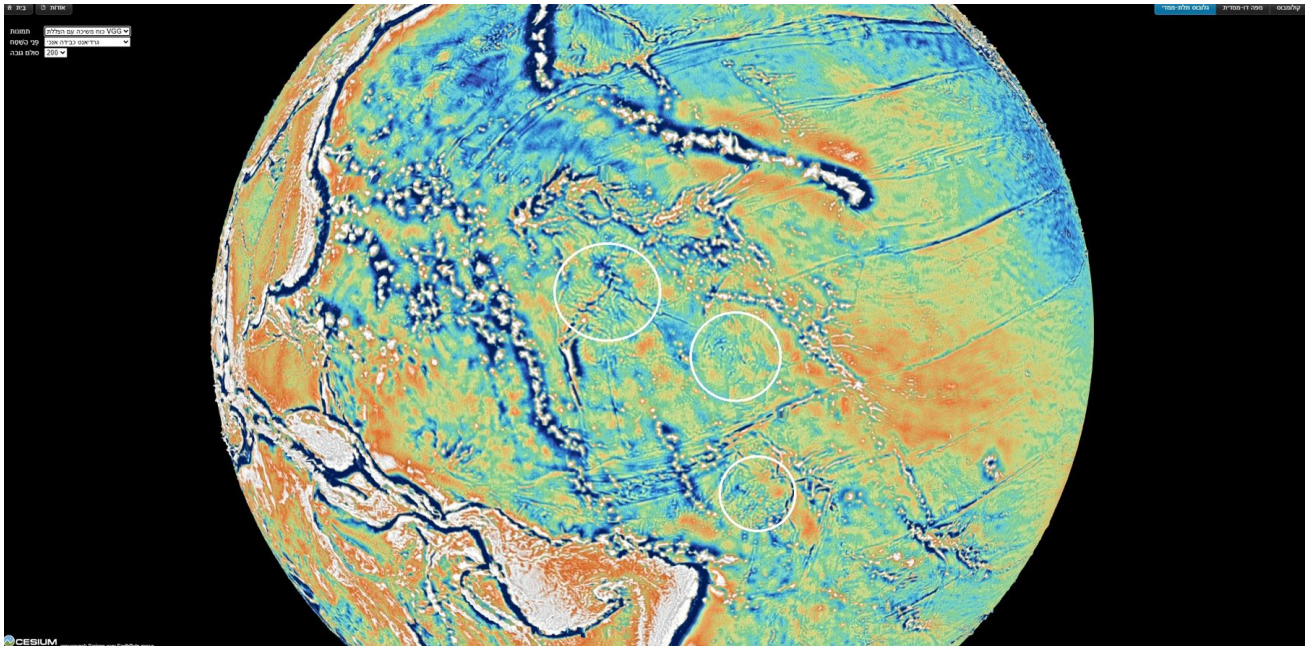
אחרי הבסיס, כך שהאגס נטה לאחור, נגד הסיבוב (מאמר 3). כשהאגס נאסף בחזרה לתוך כדור הארץ, הקצה ירד לשם שאליו נטה, בצד המערבי. הבסיס שוכן על קו המשווה של מערכת הפסים (1.6° ממנו), וכך גם השפה הדרומית של הקצה (הכיפוף הדרומי, 0.1° ממנו); מרכז הקצה שוכן כ- 15° צפונית לקו המשווה הזה (14.9°) בהתאמה של 11° ; 14.4° בנטייה של 10° ו- 16.4° בנטייה של 14°), בין הכיפוף הדרומי שעל קו המשווה לכיפוף הצפוני שעל המקביל של Pioneer. אין זה קו הרוחב של השחרור, 22.5° , של מאמרים 3–4: זהו הכיוון של מרכז הירח כפי שהוא נראה ממרכז כדור הארץ ברגע השחרור, ואילו הטביעה היא המקום שבו ירד הקצה כשהאגס נאסף בחזרה, במערכת של הפסים — שני גדלים שונים; הצירים הם עבודה עתידית.

C.3 הימות על כדור הארץ — תמונת ראי

השאלה של סעיף זה היא אם פני הקצה שמרו סימן של הירח שישב עליהם. במאמר 3 הצד הקרוב של הירח — הצד הפונה אל כדור הארץ — היה הצד שבמגע עם הקצה, והימות שלו הם פתחים שדרכם עברו הלחץ והחום של כדור הארץ מן האגס אל הירח (Imbrium המעבר הראשי, Serenitatis המשני). אם קרקעית האוקיינוס השקט מחזיקה עקבה של המגע הזה, היא צריכה להחזיק את הדפוס של ימות הצד הקרוב, בסידור הנכון ובגודל הנכון. הסידור הוא תמונת ראי, והגודל גדול מן הירח של היום. אנו מתחילים בשתי הנקודות האלה.

מדוע ראי. הירח וקצה האגס עמדו פנים אל פנים. בין שני גופים הפונים זה אל זה, מזרח בצד הקרוב של הירח נופל על מערב בכדור הארץ: טביעה של המגע חייבת להיות תמונת ראי של הצד הקרוב — הצפון נשמר, המזרח והמערב מתחלפים. חותמת גומי מראה מדוע. האותיות בחותמת חקוקות הפוך כדי שהדפס על הנייר ייקרא נכון: החותמת והנייר פונים זה אל זה, וההדפס הוא תמונת הראי של החותמת. באותו אופן, הניחו כף יד שטוחה על חלון והסתכלו עליה מבחוץ: האגודל שהיה בצד ימין כשהסתכלתם על כף ידכם שלכם נמצא עכשיו בצד שמאל. הצפון והדרום אינם מתחלפים, משום שהירח וכדור הארץ הסתובבו סביב אותו ציר וחלקו את אותו "למעלה"; רק המזרח והמערב מתחלפים.

הקריאה הראשונה. על מפת גרדיאנט הכבידה המחבר סימן תחילה שלוש תכונות מעגליות כ-Imbrium, Nectaris ו-Serenitatis (איור C.1). המרחק Imbrium–Serenitatis ביניהן, 1,420 ק"מ, התאים למרחק הירחי מוגדל בהתכווצות (להלן), אבל השלוש יצרו תמונה ישירה, לא תמונת ראי; Nectaris נפל אז 574 ק"מ ממקומו בהעתק ישיר ו-2,500 ק"מ ממקומו בתמונת ראי. טביעה ישירה אינה יכולה לבוא משני פנים שבמגע, והקריאה הוחלפה. אנו שומרים את הצעד הזה במאמר משום שהוא חלק מן החקירה: הסימנים הראשונים נעשו בעין, לפני שהגאומטריה של המגע נבנתה, ודרישת הראי היא שהראתה שאין הם יכולים להיות כולם נכונים. הקריאה שהחליפה אותה (להלן) שומרת את הסימן האחד שהמחבר בטוח בו ביותר, Imbrium, ונותנת לראי לנבא היכן חייבים לשכון האחרים.



איור C.1. הקריאה הראשונה: שלושת המעגלים כפי שסומנו תחילה בידי המחבר. תמונה: המחבר.

קנה המידה. הירח התכווץ מאז שישב על הקצה. באותה מסה, מצפיפות הגוף על הקצה (1,300 ק"ג/מ"ק) עד צפיפותו היום (3,344), כל אורך על פניו התקצר פי $1.37 = (3344/1300)^{1/3}$ (דרך שלבי הסדרה: $0.83 \times$ מעדשה לכדור ואחר כך 1,890 – 1,737 ק"מ: 1.31). המרחק Imbrium–Serenitatis, 1,023 ק"מ על הירח היום, היה כ-1,400 ק"מ על הקצה.

הנימוק קצר. מסת הירח לא השתנתה; צפיפותו עלתה, מזו של הגוף התפוח שעל הקצה לזו של הירח היום. באותה מסה, הנפח קטן ביחס הפוך לעליית הצפיפות, והרדיוס — ועמו כל מרחק בין שתי נקודות על פני השטח — קטן כשורש השלישי של היחס הזה:

$$\frac{\text{a length on the tip}}{\text{the same length today}} = \left(\frac{\rho_{\text{today}}}{\rho_{\text{tip}}} \right)^{1/3} = \left(\frac{3344}{1300} \right)^{1/3} = 1.37,$$

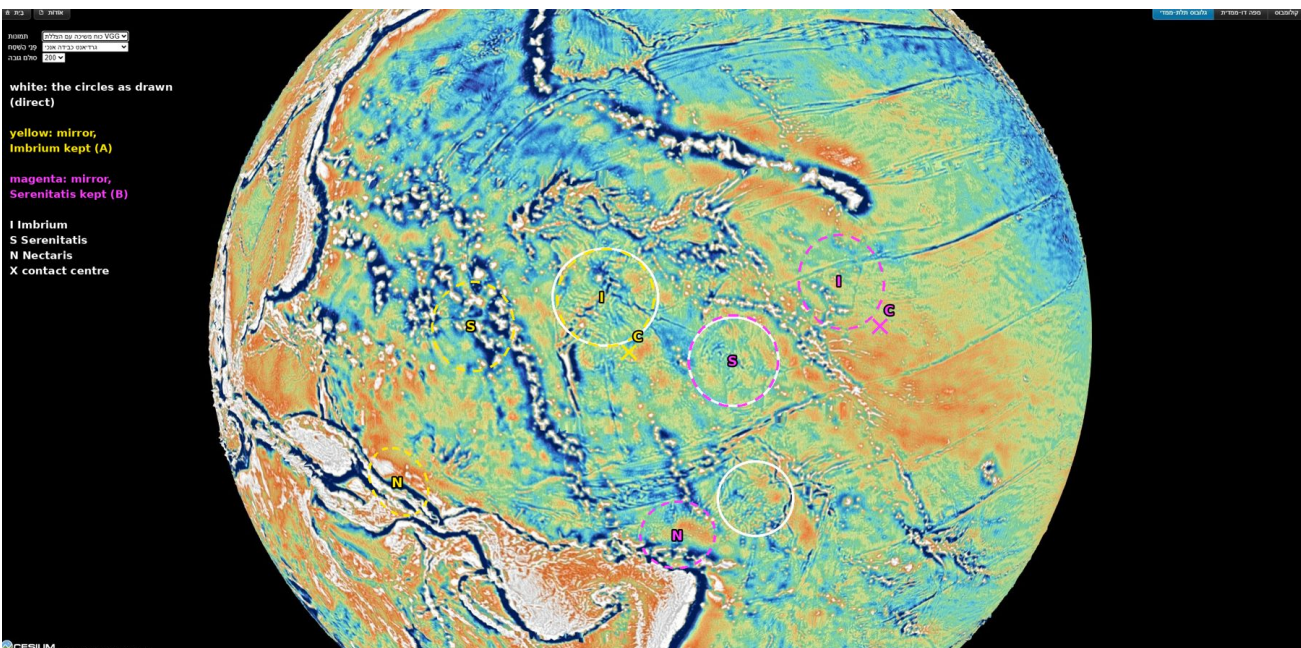
כאשר $\rho_{\text{tip}} = 1,300$ ק"ג/מ"ק היא צפיפות הגוף על הקצה ו- $\rho_{\text{today}} = 3,344$ ק"ג/מ"ק היא צפיפות הירח היום (במונה: אורך על הקצה; במכנה: אותו אורך היום). בלון שמוציאים ממנו אוויר עד גודל קטן יותר מראה את אותו דבר: שתי נקודות שצוירו עליו מתקרבות זו לזו באותו יחס כמו הרדיוס שלו. הדרך השנייה שבסוגריים עוקבת אחר אותו גוף דרך שלבי הסדרה. תחילה, כשהוא עדיין מחובר לקצה, הירח הפחוס, דמוי העדשה, התעגל לכדור; ההתעגלות הזאת אירעה לפני השחרור, והיא משנה את האורכים על פני השטח בגורם 0.83. אחר כך, מן השחרור ואילך, הירח העגול התכווץ מרדיוס של 1,890 ק"מ ל-1,737 ק"מ. יחד נותנים שני השלבים 1.31. שתי הדרכים מסכימות בתוך אחוזים ספורים; אנו משתמשים ב-1.37. המרחק בין Imbrium ל-Serenitatis, 1,023 ק"מ היום, הוא אפוא כ-1,400 ק"מ בגודל שהיה לירח על הקצה, ובגודל הזה יש לחפש את הצד הקרוב על כדור הארץ.

תוצאה

טביעת הצד הקרוב על כדור הארץ היא תמונת ראי (הצפון נשמר, המזרח והמערב מתחלפים), מוגדלת פי $1.37 = (3344/1300)^{1/3}$ ביחס לירח של היום.

תמונת הראי. כשמשאירים את Imbrium היכן שהמחבר סימן אותו (13.19° צפון 179.04° מזרח) ומעבירים את הצד הקרוב אל כדור הארץ בקנה מידה 1.37 כתמונת ראי, Serenitatis נופל על שרשרת Marshall, Nectaris בין הקשתות שמצפון-מזרח לאוסטרליה, ומרכז המגע לצד Imbrium (איור C.2). יש לקבע נקודה אחת כדי למקם את התמונה, משום שכלל הראי וקנה המידה קובעים רק את צורת הדפוס ואת גודלו, לא היכן על הקרקעית הוא שוכן. קיבענו את Imbrium, המעבר הראשי, ונתנו לכלל הראי להכריע היכן חייבת ליפול כל תכונה אחרת.

אם משאירים במקום את Serenitatis במקום זאת, Imbrium נופל מצפון ל-Kiritimati, בשדה שקט שפסים חוצים אותו; מבין שתי ההצבות בראי, המחבר שופט שהראשונה מראה את התכונות המעגליות שבמפה. שתי ההצבות מצייתות לאותו כלל; הן נבדלות רק בשאלה איזה משני הסימנים הראשונים נשמר. האיור מראה את שתיהן, כדי שהקורא יוכל להשוות ביניהן.



איור C.2. מבחן הראי. לבן: הקריאה הראשונה (ישירה). צהוב: תמונת הראי כש-Imbrium נשמר במקומו (A). מגנטה: תמונת הראי כש-Serenitatis נשמר במקומו (B). X: מרכז המגע. על מפת המחבר. השוו את המעגלים הלבנים, שהוצבו בעין, לצהובים, שהוצבו בכלל הראי מתוך Imbrium בלבד.

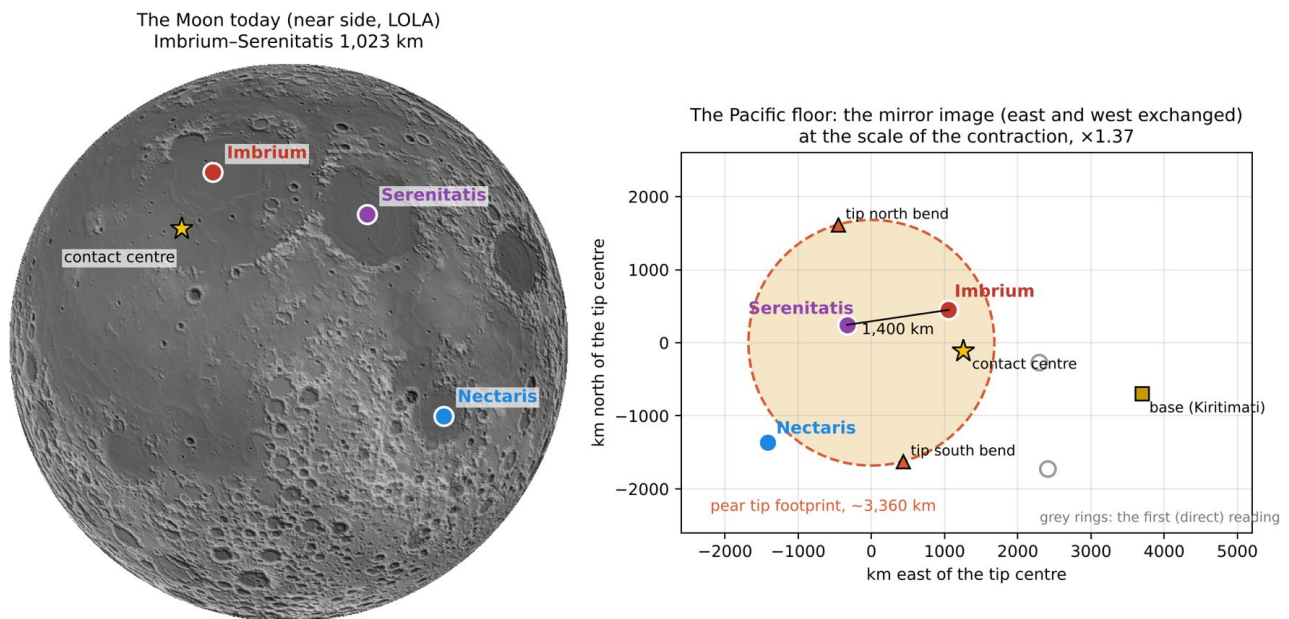
על הירח	על כדור הארץ	ממרכז הקצה	מן הבסיס
Imbrium	צפון 340.0° מזרח 137.6° צפון 179.04° מזרח 13.19°	ק"מ 1,150	ק"מ 2,870
Serenitatis	צפון 18.4° מזרח 127.3° צפון 166.3° מזרח $\approx 11.5^{\circ}$	ק"מ 410	ק"מ 4,140
מרכז המגע	צפון 335.2° מזרח 24.1° צפון 179.3° מערב $\approx 8.2^{\circ}$	ק"מ 1,260	ק"מ 2,510
Nectaris	דרום 35.0° מזרח 15.2° דרום 156.6° מזרח $\approx 3.1^{\circ}$	ק"מ 1,970	ק"מ 5,130

על כדור הארץ: תמונת ראי ב-1.37. Imbrium הוא הסימן של המחבר; האחרים הם המקומות שהראי מנבא. טביעת הקצה: רדיוס של כ-1,680 ק"מ.

כיצד לקרוא את הטבלה. כל שורה היא תכונה אחת של הצד הקרוב. העמודה הראשונה נותנת את מקומה על הירח היום; השנייה, את מקומה על כדור הארץ — ל-Imbrium הסימן של המחבר, לאחרים המקום שכלל הראי מנבא. שתי העמודות האחרונות נותנות את המרחק של אותו מקום על כדור הארץ ממרכז הקצה (C.1) ומבסיס האגס. המבחן נמצא בעמודה השלישית: תכונה שהייתה במגע עם הקצה צריכה לשכון בתוך טביעת הקצה, כלומר בתוך כ-1,680 ק"מ ממרכזו — מחצית הרוחב שבין שני הכיפופים, 3,360 ק"מ.

Serenitatis, Imbrium ומרכז המגע נופלים כולם בתוך טביעת הקצה; Nectaris, הרחק בדרום על הירח, נופל ממש מחוצה לה. Serenitatis, המעבר המשני, נופל 410 ק"מ ממרכז הקצה; Imbrium, המעבר הראשי, 1,150 ק"מ; מרכז המגע 1,260 ק"מ. Nectaris שוכן הרחק מדרום למגע גם על הירח, וב-1,970 ק"מ הוא נופל ממש מעבר לטביעה, כפי שמקומו על הירח היה מוביל לצפות.

מה שנמדד כאן הוא ההתאמה של המקומות המנובאים לתכונות שהעין מבחינה בהן; את התכונות שבמקומות הראי עוד יש לסמן ולמדוד על המפה (חלק G). זהו מחקר 8: לסמן את התכונות שבמקומות הראי של Serenitatis, Nectaris ומרכז המגע, ושל שאר ימות הצד הקרוב בקנה מידה 1.37, ולבדוק אם בכל אחד מהם עומדת תכונה מעגלית.



איור C.3. משמאל: Imbrium, Serenitatis, Nectaris ומרכז המגע על הירח היום. מימין: תמונת הראי שלהם על קרקעית האוקיינוס השקט בקנה מידה 1.37, בקילומטרים ממרכז הקצה, עם טביעת הקצה, שני הכיפופים והבסיס; טבעות אפורות: הקריאה הראשונה, הישירה. קראו את שני הלוחות זה לצד זה: מימין, הדפוס של הלוח השמאלי הפוך מזרח במערב ומוגדל, ושלושה מארבעת סימניו נופלים בתוך טביעת הקצה.

C.4 אורך הפסים הוא אורך האגס

הפסים הם הקיר המוביל של האגס. האגס נאסף בחזרה לאט, ותוך כך הקיר המוביל שלו נמרח לאורך הקרקעית בכיוון הסיבוב: הקצה הרחוק של הקיר פיגר יותר מכול, האמצע פחות, והקיר התקפל לאחור על עצמו; המסות שלו נספגו בכדור הארץ והותירו קמטים — הפסים. קיר שהונח כך צריך לכסות את הקרקעית בערך לאורך שהיה לו. הדימוי של עץ כרות, השוכב לאורך קטע קרקע השווה לגובהו, ממחיש רק את ההתאמה הזאת של האורכים; הקיר לא הופל, אלא נמרח כשהאגס נאסף בחזרה.

אורך האגס נקבע בידי קו הקורוציה. גוף המשלים סיבוב אחד בכל יום של כדור הארץ נע מהר יותר ככל שהוא רחוק יותר ממרכז כדור הארץ; גוף במסלול חופשי סביב כדור הארץ נע לאט יותר ככל שהוא רחוק יותר. במרחק אחד שתי המהירויות שוות: שם, גוף הנישא סביב עם כדור הארץ כבר נע במהירות של מסלול חופשי ואינו צריך עוד שיחזיקו אותו. המרחק הזה הוא קו הקורוציה. בסדרה, האגס התארך עד שמרכז הירח הגיע לקו הזה; שם הירח התחיל להיפרד, והוא השתחרר כ-210 ק"מ מעבר לקו (מאמרים 2–4). בשחרור היה היום של כדור הארץ 5.77 שעות. על קו המשווה של אותה עת שכן קו הקורוציה 16,399 ק"מ ממרכז כדור הארץ; לאורך קו הרחוב של השחרור, 22.5° (מאמרים 3–4), הכיוון שבו עמד הירח, הוא שכן 17,287 ק"מ ממנו. רדיוס הירח בשחרור היה 1,890 ק"מ, ומרכזו עמד כ-210 ק"מ מעבר לקו, ב-17,497 ק"מ.

מן המספרים האלה נובעים שני אורכים, לפי השאלה אם הירח נחשב לחלק מן האגס. **כשהירח נחשב לקצה האגס**, האגס הגיע לקו הקורוטציה: מפני כדור הארץ עד הקו הוא היה $10,570-10,690$ ק"מ. **גופו של האגס עצמו**, בלי הירח, הסתיים במקום שבו ישב עליו הירח — בשחרור, רדיוס ירח אחד פנימה ממרכז הירח, $15,607 = 17,497 - 1,890$ ק"מ ממרכז כדור הארץ, כ-1,700 ק"מ לפני הקו. לכן אורכו מפני כדור הארץ היה $8,890-9,000$ ק"מ. בלי הירח, האגס לא הגיע לקורוטציה: הוא הסתיים כרדיוס ירח אחד לפני הקו, וקוטר ירח שלם לפני הצד החיצוני של הירח.

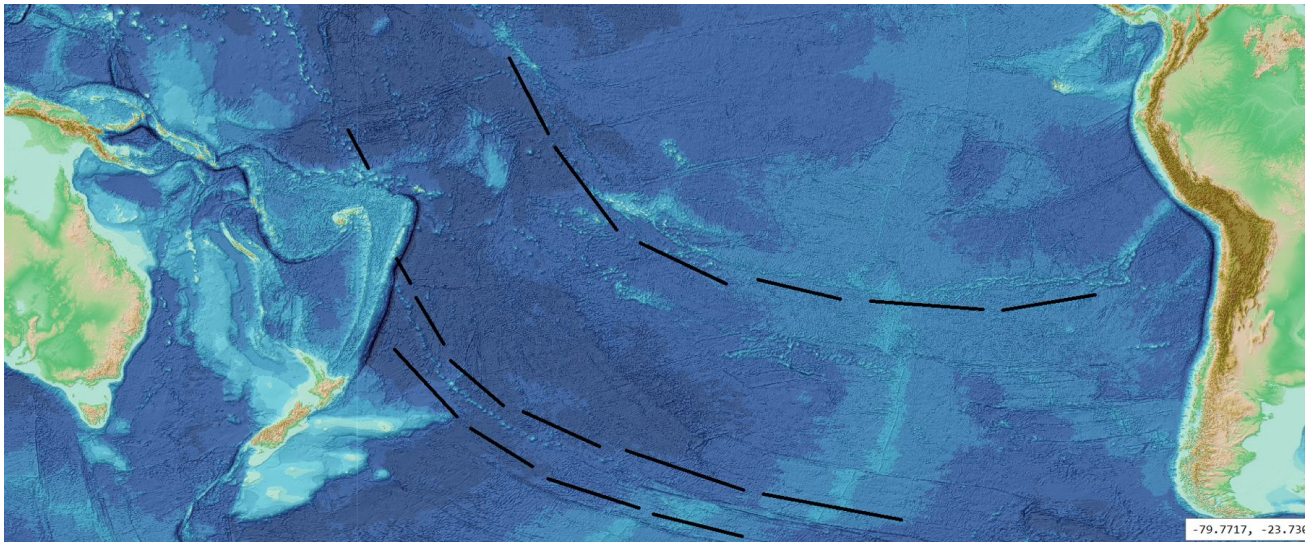
אורך	
ק"מ 10,570–10,690	האגס כשהירח הוא קצהו: מפני כדור הארץ (6,602–6,721 ק"מ) עד קו הקורוטציה בקו הרוחב של השחרור (17,287 ק"מ, יום של 5.77 שעות)
ק"מ 8,890–9,000	גופו של האגס עצמו, עם אזור הקצה: מפני כדור הארץ עד המקום שבו ישב הירח בשחרור (17,497 פחות 1,890, כלומר 15,607 ק"מ)
ק"מ 9,360	הפסים: ממרכז הקצה (9.3° צפון 169.3° מזרח) עד הקצה המזרחי של Clipperton (כ- 10.3° צפון 105° מערב)
ק"מ 5,870	מן הבסיס (Kiritimati) עד אותו קצה
כ-3,760 ק"מ	מן הקצה עד הבסיס

שתי השורות הראשונות הן שני האורכים של האגס בשחרור, עם הירח ובלעדיו (רדיוס כדור הארץ באותה עת הוא 6,602 עד 6,721 ק"מ בסדרה). השורה השלישית היא אורכה של מערכת הפסים על הקרקעית, מן המקום שבו ירד הקצה (C.1) עד הקצה המזרחי הרחוק של הפס הארוך ביותר, ליד אמריקה. שתי השורות האחרונות מחלקות את האורך הזה בבסיס: החלק שמזרחה מן הבסיס והחלק שבין הקצה לבסיס. (סכום שני החלקים גדול מן השלם, משום שהקצה, הבסיס וקצה Clipperton אינם שוכנים על מעגל גדול אחד.)

את הפסים משווים לאורך השני, גופו של האגס עצמו עם אזור הקצה. הפסים הם העקבה של האגס כולו, כולל אזור הקצה שלו: המגע בן 3,000 הק"מ שעליו ישב הירח ירד עם האגס (C.1–C.2), ומערכת הפסים נמדדת ממרכזו. הירח עזב את האגס ואינו על הקרקעית, ולכן החלק של האורך שהירח הוסיף אינו חלק מן העקבה. מערכת הפסים, ממקום הקצה עד אמריקה, ארוכה ב-4%–5 מגופו של האגס עצמו: לגוף באורך 8,890 עד 9,000 ק"מ מתאימה עקבה על הקרקעית באורך 9,360 ק"מ, 360 עד 470 ק"מ יותר. שום דבר בהתאמת הפסים לא נקבע כדי לתת את האורך הזה: קו הקורוטציה בא מסיבובו של כדור הארץ בשחרור (מאמר 2), רדיוס הירח ממאמר 3, ואורך הפסים מן המפה.

5.c הפסים של האוקיינוס השקט כולו מובילים אל קצה האגס

סעיפים C.1–C.4 מצאו את הקצה מתוך הפסים של צפון האוקיינוס השקט: שני הכיפופים שלהם מערבה מן הרכסים מסמנים את שוליו. אבל הפסים של צפון האוקיינוס השקט הם רק חלק מן הקווים שעל קרקעית האוקיינוס. דרומה יותר עובר קו מרכזי מערבה מדרום אמריקה, לאורך Sala y Gomez ואי הפסחא, ופונה צפון-מערבה לאורך Tuamotu; ודרומה עוד יותר עוברים קווים ארוכים צפון-מערבה מן הקצה הדרום-מזרחי הרחוק של האוקיינוס. התובנה של המחבר היא שכולם, כשעוקבים אחריהם מאמריקה מערבה, מנותבים אל הקצה: הקווים הדרומיים מתכופפים צפונה ליד Tonga–Kermadec, והקו המרכזי פונה צפון-מערבה אל אותו אזור (איור C.4). אם הפסים הם העקבה של האגס, הקווים של הצפון, המרכז והדרום צריכים כולם להוביל אל המקום האחד שבו ירד הקצה. הסעיף הזה בודק זאת על רשת עולמית של עומק קרקעית האוקיינוס.



איור C.4. השרטוט של המחבר לקווים של דרום האוקיינוס השקט (בשחור), על מפת הטופוגרפיה של הקרקעית. הקו המרכזי עובר מערבה מדרום אמריקה לאורך Sala y Gomez ואי הפסחא ופונה צפון-מערבה לאורך Tuamotu; שני הקווים הדרומיים עוברים צפון-מערבה ומתכופפים צפונה ליד Tonga-Kermadec, עם קטע צפוני קצר מעבר לפיג'י. תמונה: המחבר. השרטוט הזה קבע את המסלולים שמחקר 10 עוקב אחריהם בנתונים.

STUDY 10 המחקר — מחקר 10

STEP 1 הגדרת שאלת המחקר והבעיה

התופעה. הפסים הצפוניים מתכנסים מערבה מן הרכסים לעבר הקצה (C.1, B.6); השרטוט של המחבר מעביר את אותה התכנסות אל הקווים המרכזי והדרומיים (איור C.4). **הפער בידע.** ההתכנסות נקראה על מבטים בגלובוס, ורק לפסים הצפוניים; היא לא שורטטה בנתונים לשלוש המערכות יחד, אל מטרה שנקבעה מראש. **שאלת המחקר:** כשמשרטטים אותם בנתונים מקצותיהם האמריקניים מערבה, האם הפסים של הצפון (Sala y Gomez–Easter–Tuamotu–Line), של המרכז (Clipperton, Clarion, Molokai, Murray, Mendocino), ושל הדרום (Islands) (מערכת Eltanin עם שרשרת Louisville; שרשרת Tuvalu–Gilbert–Ratak) מובילים אל קצה האגס?

STEP 2 סקירת ספרות (רקע מדעי)

הקווים שבהם משתמשים כאן ממופים זה מכבר במפות של קרקעית האוקיינוס, ושמותיהם ניתנו על שם מקומות ותופעות סמוכים; כמו בשאר המאמר, השמות משמשים רק כשמות של מקומות על המפה. הנתונים הם רשת GEBCO 2026 (GEBCO Compilation Group 2026), הקובץ העולמי של עומק קרקעית האוקיינוס, המתפרסם מדי שנה מתוך מדידות עומק של ספינות ומכבידת לוויינים. כשמאירים אותה מצד אחד — "הצללת תבליט" (hillshade) — הרשת מראה קווים על הקרקעית כרצועות של אור וצל, כמו ששמש נמוכה מראה את התלמים של שדה חרוש. **מה חדש כאן:** הקווים של שלוש המערכות נבדקים יחד, בכלל אחד שנכתב לפני השרטוט, אל שתי מטרות הלקוחות מן המאמר הזה.

STEP 3 ניסוח השערת המחקר

כשעוקבים אחריהם מערבה, הפסים של הצפון, המרכז והדרום מובילים אל קצה האגס: ההמשכים המערביים שלהם עוברים בתוך המגע הסופי, ברוחב 3,000 ק"מ, או לפחות בתוך הקצה כולו, המגע של 6,000 ק"מ; וקווים שנבחרו בלי קשר לקצה אינם מגיעים אל המגע הסופי.

STEP 4 מערך המחקר (מתודולוגיה)

סוג המחקר: כמותי, על רשת עולמית, כשהכלל נקבע בכתב לפני ששורטט קו כלשהו (18 באוקטובר 2026). **המטרות.** המגע הסופי, שעליו ישב הירח בשחרור: מרכז ב- 8.7° צפון, 167.7° מזרח, 190 ק"מ ממרכז הכיפופים (C.1), רדיוס $1,500$ ק"מ (מחצית $3,000$ ק"מ). קצה האגס, המגע של $6,000$ ק"מ שלפני ההצטמצמות: מרכז בערך ב- 6° צפון, 179.5° מערב, 250 ק"מ ממרכז המגע המשתקף של C.3, רדיוס $3,000$ ק"מ. **הנתונים:** הצללת התבליט של GEBCO 2026 בשלושה חלקים — צפון (0° – 45° צפון, 180° – 100° מערב), דרום (0° – 65° דרום, 180° – 70° מערב) ואזור הקצה (45° דרום עד 25° צפון, 150° – 180° מזרח) — שחוברו למפה אחת ב-30 נקודות למעלה. **השרטוט.** כל קו נעקב מקצהו האמריקני מערבה בצעדים של 0.5° . בכל צעד מונחת לפני הנקודה האחרונה מניפה של קווי ניסיון קצרים, באורך 2° – 2.5° , מסובבים עד $\pm 10^{\circ}$ ומוזזים הצידה ב- 0.2° – 0.4° — מסנן כיווני — והצעד הולך אל קו הניסיון שלאורכו הקרקעית מראה את השפה החדה ביותר לרוחבו. החדות היא יחס: השינוי התלול ביותר לרוחב הקו חלקי השינוי הטיפוסי סביבו. צעד נחשב רציף אם היחס 4.5 לפחות, חלש בין 4.0 ל- 4.5 , ומגושר מתחת ל- 4.0 ; במקומות ובכיוונים אקראיים 95 מכל 100 יחסים נופלים מתחת ל- 4.2 , ובקו אקראי באורך 10° החציון הוא 10% צעדים נתמכים (90 מכל 100 מתחת ל- 35%). במקום שבו קו מתכופף או שרשרת פונה, המסלול הונחה בנקודות שנבחרו בעין על מבטים מוגדלים, וכל כיפוף נבדק בעין; המיקומים עדיין נצמדים לנתונים, ושיעור הצעדים הנתמכים בא מן הנתונים בלבד. **ההמשכה.** מעגל גדול — הדרך הקצרה ביותר על הכדור, הקו שמסלול ישר עובר על הגלובוס — מותאם לשליש האחרון של המסלול הנתמך ומומשך מערבה עד $12,000$ ק"מ; נרשם המרחק הקרוב ביותר שלו מכל אחד מן המרכזים. **ההכרעה,** שנקבעה מראש: מגע סופי אם ההמשכה עוברת בטווח $1,500$ ק"מ ממרכזו; אחרת אזור הקצה אם בטווח $3,000$ ק"מ ממרכז הקצה; אחרת מחטיא. כל קו ששורטט מדווח; אף אחד לא הוסר בדיעבד. **קווי הייחוס:** שלושה קווים שהמחבר לא שרטט כמסלולים אל הקצה — Pioneer בצפון, Marquesas-I Galapagos במרכז — שורטטו באותו כלל. **רגישות:** ההתאמה חוזרה על הרבע האחרון ועל המחצית האחרונה של כל מסלול.

STEP 5 איסוף הנתונים (ביצוע המחקר)

המחקר התחיל בקווים ישרים דרך שתי נקודות של כל פס. השרטוט של המחבר, שבו הקווים הדרומיים מתכופפים צפונה ליד Tonga-Kermadec, הראה שהקווים של הדרום מעוקלים ויש לעקוב אחריהם לאורך מהלכם שלהם; לכן המחקר בוצע בשרטוט, באותן מטרות ובאותן הכרעות. בנתונים המסלולים הם אלה. **הצפון:** כל פס נעקב מחוף צפון אמריקה מערבה עד 154° – 174° מערב, שם הוא מגיע אל רכס Hawaii, אל איי Line, או אל Johnston ואל ההרים של מרכז האוקיינוס השקט (Mid-Pacific Mountains). **המרכז:** Sala y Gomez – Easter (66% מן הצעדים נתמכים), מערבה מן הרכס של מזרח האוקיינוס השקט (East Pacific Rise) עד Gambier (60%), Tuamotu (78%), ואיי Line, רציפים בעין עד Johnston (169.5° מערב, 16.7° צפון); ענף מערבי יוצא מאיי Line ב- 11° צפון. **הדרום, המסלול העליון:** הגדיל הצפוני של מערכת Eltanin (77%), צעד של כ- 150 ק"מ אל שרשרת Louisville (67%), העוברת צפון-צפון-מערבה עד תעלת Kermadec ב- 175° מערב, 26° דרום, ושם היא מסתיימת; מעבר ל-Tonga ולפיג'י שרשרת Tuvalu-Gilbert-Ratak (74%) עוברת צפון-מערבה אל תוך המגע הסופי, עד 167.9° מזרח, 10.7° צפון — השרשרת ש-D.1 קורא כרכסי השפכטל המערביים. **הדרום, המסלול התחתון:** הגדיל הדרומי של מערכת Eltanin (64%). השיעורים הנתמכים, 60% – 78% , גבוהים בהרבה מ- 10% של קו אקראי. איור C.5 מראה כל מסלול, והטבלה בשלב 6 נותנת את המדידות.

STEP 6 ניתוח הנתונים ועיבודם

הטבלה נותנת, לכל מסלול, היכן הנתונים תומכים בו בפעם האחרונה ובאיזה כיוון הוא נע אז, כמה היה צריך להמשיך אותו, וכמה קרוב ההמשך שלו מגיע אל שני המרכזים. השורות מסודרות לפי המרחק מן המגע הסופי; הצבע של העמודה הזאת עובר מירוק, בתוך המגע הסופי, לכתום, מחוצה לו.

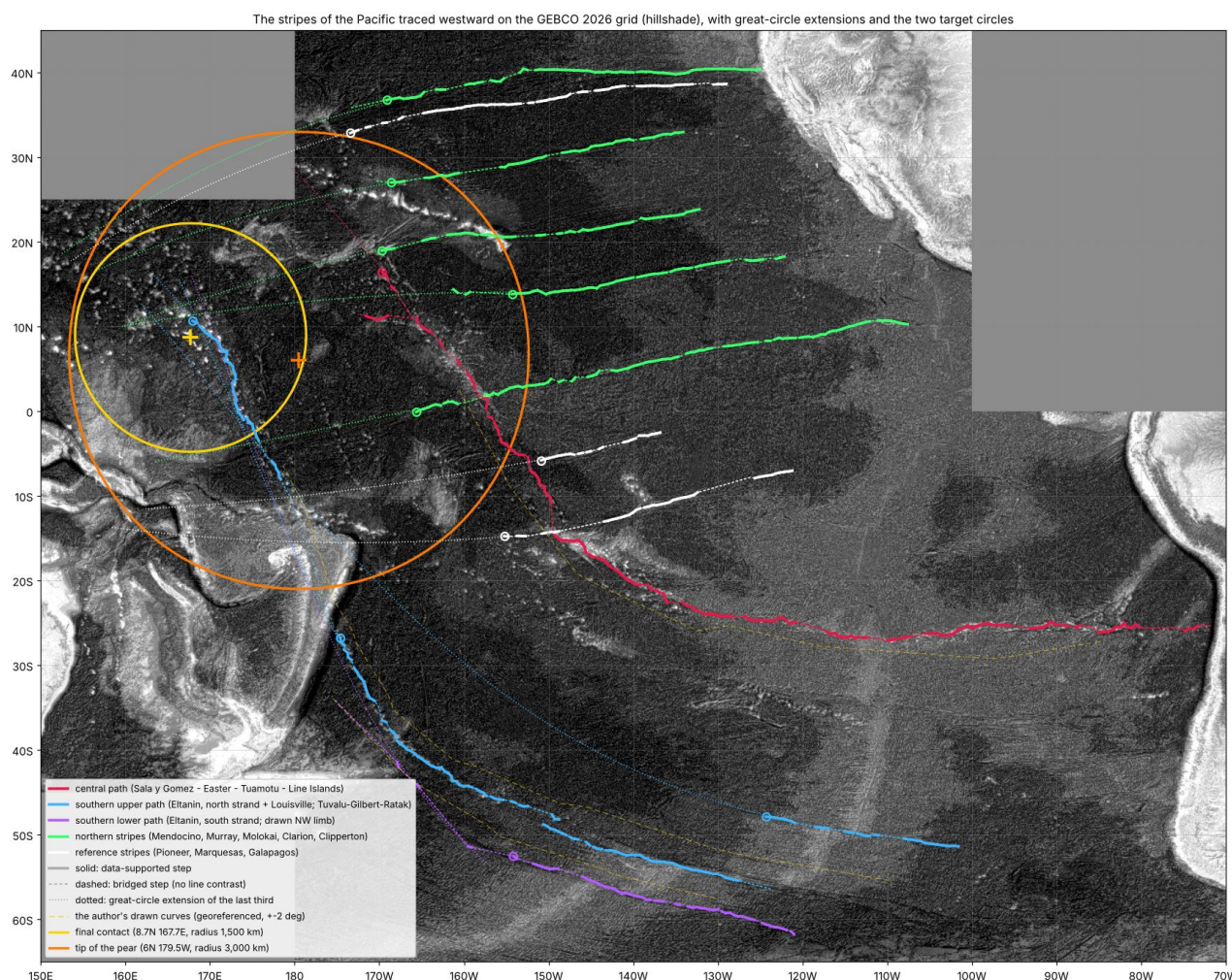
כיצד לקרוא את הטבלה שלהלן: רדו לאורך העמודה החמישית. שישה מעשרת המסלולים עוברים בטווח 1,500 ק"מ ממרכז המגע הסופי, וחמישה מהם בטווח 450 ק"מ: המסלול הדרומי העליון ב-166 ק"מ, שרשרת Tuvalu–Gilbert–Ratak, הנכנסת אל תוך המגע הסופי, ב-190 ק"מ, Clarion ב-288 ק"מ, המסלול הדרומי התחתון ב-300 ק"מ, Molokai ב-434 ק"מ; Murray ב-1,274 ק"מ. Clipperton מחטיא את המגע הסופי ב-14 ק"מ. כל עשרת המסלולים מגיעים אל אזור הקצה, בטווח 3,000 ק"מ ממרכזו; המסלול המרכזי עושה זאת ב-1,340–1,601 ק"מ. משלושת קווי הייחוס, אף אחד אינו מתקרב לטווח 1,500 ק"מ מן המגע הסופי (1,656–2,590 ק"מ). כשההתאמה נעשית על הרבע האחרון או על המחצית האחרונה של כל מסלול במקום על השליש האחרון, כל אחד מן השישה שומר על הכרעתו (62–1,274 ק"מ).

מבחן מקריות. מעגלים גדולים הותחלו במקומות אקראיים באוקיינוס השקט בכיווני הפסים (240°–300° בצפון, 290°–340° בדרום) והומשכו כמו המסלולים. הם מגיעים אל המגע הסופי ב-44–55 מכל 100 ניסיונות ואל מעגל הקצה ב-80–88; בכל כיוון מערבי שהוא — ב-25 וב-54.

מסלול	נקודה אמינה אחרונה, כיוון	הומשך (ק"מ)	אל המגע הסופי (ק"מ)	אל מרכז הקצה (ק"מ)	הכרעה
דרום	עליון: Eltanin (הגדיל הצפוני) Louisville +	174.6° מערב, 26.8° דרום, (335°) NNW	4,380	166	1,025 מגע סופי
דרום	עליון, מעבר לפיג'י: Tuvalu–Gilbert–Ratak (שורטט, לא הומשך)	167.9° מזרח, 10.7° צפון, (319°) NW	0	190	851 מגע סופי
צפון	Clarion	154.3° מערב, 13.8° צפון, W (270°)	4,170	288	760 מגע סופי
דרום	תחתון: Eltanin (הגדיל הדרומי)	154.2° מערב, 52.5° דרום, (325°) NW	7,690	300	928 מגע סופי
צפון	Molokai	169.7° מערב, 18.9° צפון, (257°) WSW	2,660	434	1,147 מגע סופי
צפון	Murray	168.6° מערב, 27.0° צפון, W (260°)	2,980	1,274	2,004 מגע סופי
צפון	Clipperton	165.7° מערב, 0.1° דרום, (258°) WSW	2,720	1,514	944 אזור הקצה
צפון	Mendocino	169.1° מערב, 36.8° צפון, (253°) WSW	3,480	1,826	2,770 אזור הקצה

מרכז	הענף המערבי ב-11° צפון	171.6° מערב 11.2° צפון, (318°) NW	קצר	2,094	1,340	אזור הקצה
מרכז	Sala y Gomez– Easter– Tuamotu– ,Line Islands עד Johnston	169.7° מערב 16.4° צפון, (323°) NW	קצר	2,441	1,601	אזור הקצה
קווי ייחוס (לא שורטטו בידי המחבר כמסלולים אל הקצה)						
צפון	Pioneer	173.4° מערב 32.8° צפון, (251°) WSW	2,910	1,656	2,563	אזור הקצה
מרכז	Galapagos	150.9° מערב 5.8° דרום, W (260°)	4,420	2,205	1,769	אזור הקצה
מרכז	Marquesas	155.3° מערב 14.7° דרום, (265°) W	4,220	2,590	2,381	אזור הקצה

המרחקים הם הגישה הקרובה ביותר של המשכת המעגל הגדול של השליש האחרון של כל מסלול (לשרשרת Tuvalu–Gilbert–Ratak — של המסלול המשורטט עצמו) אל מרכז המגע הסופי (8.7° צפון, 167.7° מזרח) ואל מרכז הקצה (6° צפון, 179.5° מערב). כיוון: כיוון המסלול בנקודה האמינה האחרונה שלו, במעלות עם כיוון השעון מן הצפון. ירוק: בתוך המגע הסופי, עמוק יותר ככל שקרוב יותר; כתום: מחוצה לו, עמוק יותר ככל שרחוק יותר. נתונים: GEBCO 2026.



איור C.5. הפסים של האוקיינוס השקט משורטטים מערבה על רשת GEBCO 2026 (הצללת תבליט; היטל plate carrée; אפור: חלקים שלא נעשה בהם שימוש). ירוק: הפסים הצפוניים (Clipperton, Clarion, Molokai, Murray, Mendocino). אדום: המסלול המרכזי (Sala y Gomez–Easter–Tuamotu–Line Islands), עם הענף המערבי שלו ב-11° צפון. כחול: המסלול הדרומי העליון (הגדיל הצפוני של מערכת Eltanin ושרשרת Louisville; צפונה לפיג'י – שרשרת Tuvalu–Gilbert–Ratak; הקו הכחול ב-48°–51° דרום, 102°–124° מערב הוא קצה מזרחי חלופי). סגול: המסלול הדרומי התחתון (הגדיל הדרומי של מערכת Eltanin, עם הזרוע הצפון-מערבית כפי ששורטטה). לבן: קווי הייחוס (Marquesas, Galapagos, Pioneer). צעדים הנתמכים בנתונים; מקווקו: צעדים מגושרים; מנוקד: המשכת המעגל הגדול של השליש האחרון; עיגולים: הנקודה האמינה האחרונה של כל מסלול. קווים צהובים דקים מקווקוים: העקומות שהמחבר שרטט (איור C.4). מעגל וצלב צהובים: המגע הסופי (8.7° צפון, 167.7° מזרח, רדיוס 1,500 ק"מ); כתום: קצה האגס (6° צפון, 179.5° מערב, רדיוס 3,000 ק"מ). נתונים: GEBCO Compilation Group (2026); שרטוט: מאמר זה. עקבו אחר כל צבע מן השפה הימנית של המפה מערבה: המסלולים הירוקים, האדומים, הכחולים והסגולים נכנסים כולם אל המעגל הכתום, והמסלול הכחול נכנס אל המעגל הצהוב.

STEP 7 הסקת מסקנות וכתיבת הדוח

תוצאה. ההשערה נתמכת. כשמשרטטים אותם בנתונים מאמריקה מערבה, הפסים של הצפון, המרכז והדרום של האוקיינוס השקט מובילים אל קצה האגס: כל עשרת המסלולים מגיעים אל אזור הקצה, שישה מהם עוברים בטווח 1,500 ק"מ ממרכז המגע הסופי, ואף אחד משלושת קווי הייחוס אינו עושה זאת. שני המסלולים הדרומיים, המתחילים בקצה הדרום-מזרחי הרחוק של האוקיינוס, עוברים צפון-מערבה ומתכופפים צפונה ליד Tonga–Kermadec, וההמשכים שלהם עוברים 166 ו-300 ק"מ ממרכז המגע הסופי; שרשרת Tuvalu–Gilbert–Ratak עצמה נכנסת לתוכו.

הקריאה במודל. אנו מציעים שהפסים של הצפון, המרכז והדרום הם עקבות הזרימה של האגס המתכנסת אל קצהו. הדופן המובילה של האגס עמדה לרוחב בסיסו כולו, 9,000–11,000 ק"מ, צפונה ודרומה מ-Kiritimati

(B.4); כשהאגס נאסף בחזרה, הדופן נאספה סביב הקצה (B.6), והקווים שלה הונחו על הקרקעית כשהם מתכנסים אל המקום שבו ירד הקצה. הפסים הדרומיים עוברים צפון-מערב, מתכופפים צפונה ליד Tonga–Kermadec וממשיכים לעבר הקצה; הקו המרכזי פונה צפון-מערב לאורך Tuamotu ואיי Line; הפסים הצפוניים עוברים מערבה לעבר מאמריקה. המסלולים המרכזי והדרומי מסתיימים על שתי השרשראות שחלק D קורא כרכסי השפכטל שבתוך הקצה — איי Line במזרח ושרשרת Tuvalu–Gilbert–Ratak במערב.

מגבלות. כמה מן הפגיעות נשענות על המשכה לרוחב קרקע שאין בה קו נראה: מ-2,660 ק"מ ל-Molokai עד 7,690 ק"מ למסלול הדרומי התחתון. המסלול הדרומי העליון מגיע אל שרשרת Tuvalu–Gilbert–Ratak רק דרך גשר של כ-1,800 ק"מ מעל Tonga ופיג'י, מקצה שרשרת Louisville (175° מערב, 26° דרום) אל הקצה הדרומי של השרשרת (179° מזרח, 10° דרום). הזרוע הצפון-מערבית ששורטטה לעקומה הדרומית התחתונה, מ-160° מערב 51° דרום עד תעלת Kermadec ב-175° מערב 34° דרום, לא נמצאה בנתונים (4% צעדים נתמכים, הרמה האקראית); המסלול הזה נשען על הגדיל הדרומי של מערכת Eltanin בלבד. הפסים הצפוניים מסתיימים כקווים נראים ב-154–174° מערב, בכיוון מערב עד מערב-דרום-מערב, ואינם נראים מתכופפים אל תוך המגע הסופי; הם מגיעים אליו בהמשכה, ומצפון ל-25° צפון וממערב ל-180° בחלקים שבהם נעשה שימוש אין נתונים. הקו המרכזי אינו רציף בין חוף דרום אמריקה ל-82° מערב. מעגלים גדולים העוברים מערבה לרוחב האוקיינוס השקט נוטים להתכנס אל מערב האוקיינוס השקט המשווני: במבחן המקריות המגע הסופי מושג בכמחצית מן הניסיונות, ומעגל הקצה בן 3,000 הק"מ ברובם. המדד המכריע הוא אפוא מעגל המגע הסופי, והניגוד לקווי הייחוס. **כיווני המשך למחקר.** דיגיטציה מלאה של הפסים של האוקיינוס השקט ומבחן פורמלי מול מודל של מקריות (מחקר 10, חלק G).

תוצאה

כשמשרטטים אותם על רשת GEBCO 2026 מקצותיהם האמריקניים, הפסים של הצפון, המרכז והדרום של האוקיינוס השקט מובילים כולם אל קצה האגס: שישה מעשרת המסלולים המשורטטים עוברים בטווח 1,500 ק"מ ממרכז המגע הסופי (166–1,274 ק"מ), ואף אחד משלושת קווי הייחוס אינו עושה זאת.

מה שיש בידינו עכשיו. מערבה מן הבסיס הפסים פונים לעבר אזור ברוחב 3,360 ק"מ, בין המגע של 3,000 ק"מ לכיפה של 3,650 ק"מ (C.1). האזור שוכן כ-3,760 ק"מ מערבה מן הבסיס, בצד המאסף, ושפתו הדרומית על אותו קו משווה שעליו הבסיס (C.2). בתוכו שוכנת תמונת ראי של הצד הקרוב בגודל שהיה לירח על הקצה, ו-Imbrium, Serenitatis ומרכז המגע בתוך הטביעה (C.3). מערכת הפסים, מן הקצה עד אמריקה, ארוכה כגופו של האגס עצמו עם אזור הקצה, בתוך 5% (C.4). והפסים של האוקיינוס השקט כולו — צפון, מרכז ודרום — כשהם משורטטים בנתונים, מובילים אל אותו קצה (C.5).

חלק D — רכסי השפכטל

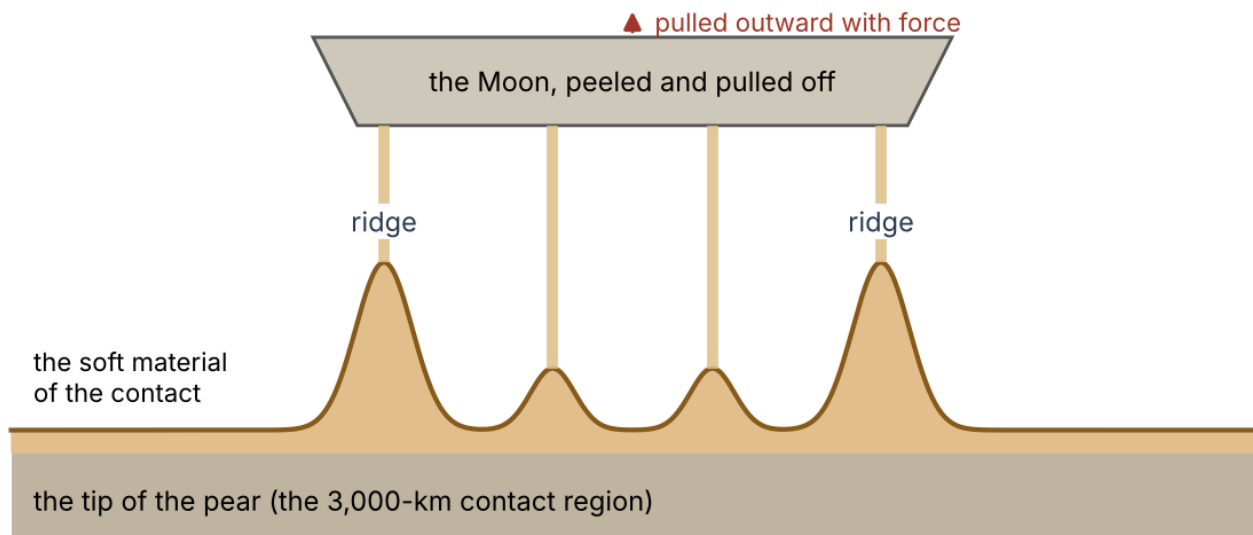
חלקים B ו-C קראו את הפסים ואת מקומו של קצה האגס. החלק הזה פונה אל שרשראות הרכסים הוולקניים הגדולות העומדות בתוך המקום הזה, בחלק של הקצה שהתקלף. השאלה שהוא משיב עליה היא האם אפשר לקרוא את השרשראות האלה כסימן שנשאר באזור המגע של קצה האגס בזמן שהירח התקלף ונמשך החוצה בכוח, ואילו תצפיות כבר נוגעות בקריאה הזאת.

D.1 הרכסים משני הצדדים

ממערב וממזרח לחותמי הימות (C.3) עומדות שרשראות הרכסים הגדולות של מרכז האוקיינוס השקט: שרשראות Marshall–Gilbert–Tuvalu במערב (ועוד יותר לצפון-מערב Wake ו-Mid-Pacific Mountains), ו-Line Islands במזרח, עם Palmyra ו-Kiritimati. אנו קוראים אותן כרכסי השפכטל: רכסים שנמשכו כלפי מעלה מלמעלה באזור המגע שבקצה האגס, שעליו ישב הירח וממנו התקלף ונמשך בכוח (מאמר 3). הם שוכנים בתוך קצה האגס עצמו, בחלקו שהתקלף. המגע הצטמצם מ-6,000 ק"מ ל-3,000 הק"מ שעליהם ישב הירח בשלבו האחרון (מאמר 3), וההצטמצמות הייתה התקלפות: רצועת המגע שהתקלפה בין ה-6,000 ל-3,000 הק"מ היא עצמה קצה האגס, והרכסים נמשכו כלפי מעלה ברצועה הזאת. החומר של המגע עוד היה רך; כשהירח נמשך ממנו, החומר הזה נמשך כלפי מעלה בין הירח לקצה, כמו הטיח שבין שפכטל לקיר, הנמשך לרכסים כשמושכים את השפכטל מן הקיר בעוד הטיח רך (איור D.1). הרכסים נשארו על פני הקצה, ברצועה שהתקלפה. כשהאגס נאסף בחזרה, אזור הקצה ירד אל קרקעית האוקיינוס השקט, מערבה מן הבסיס (C.2), והרכסים ירדו איתו.

התמונה היומיומית היא של טייח. מצמידים שפכטל שטוח לקיר המכוסה בטיח טרי ורך ומושכים אותו ישר החוצה: הטיח נדבק גם לשפכטל וגם לקיר, נמתח ביניהם ככל שהרווח נפתח, ונשאר עומד ברכסים מוגבהים — הגבוהים ביותר לאורך שולי השפכטל, שם הטיח מרפה אחרון. דבר לא דחף את הרכסים האלה כלפי מעלה מתוך הקיר; הם נמשכו כלפי מעלה מבחוץ, כשהשפכטל נמשך ממנו. במודל, הכלי הוא הירח, הקיר הוא קצה האגס על פני המגע שלו, המצטמצם מ-6,000 ל-3,000 ק"מ, והטיח הרך הוא החומר של המגע, שעוד היה רך — הוא זרם לאט, כמו דבש סמיך, במקום להישבר — כשהירח התקלף ונמשך ממנו. המשיכה לא הייתה עדינה: הירח השתחרר רק כשמעט יותר ממחציתו עברה את קו הקורוטציה, ונמשך החוצה בכוח (A.2), והמשיכה הזאת היא שמשכה את הרכסים כלפי מעלה. מגע מן הסוג הזה הוא אחת מדרישות המאמר (דרישה 4 בתיבה שבפתחו).

מה קרה עם שרשרת Hawaii–Emperor עוד אינו ידוע. אנו מציעים, בזהירות, שגם היא הייתה חלק מן השפכטל; שום דרישה של המאמר אינה נשענת עליה (D.3, F.3).



איור 1.D. השפכטל: הירח, המתקלף ונמשך בכוח מאזור המגע בן 3,000 הק"מ שבקצה, מושך את החומר של המגע, שעוד היה רך, לרכסים. סכמה. קוראים מלמטה למעלה: קצה האגס על פני המגע; החומר הרך של המגע, הנמשך לרכסים; הירח מעליו, הנמשך החוצה. הרכסים נשארים על אזור הקצה ומגיעים אל קרקעית האוקיינוס השקט כשהאגס נאסף בחזרה.

D.2 המרחק ביניהם

אם השרשראות נמשכו כלפי מעלה באזור המגע של הקצה, המפתח ביניהן צריך להיות בערך רוחב המגע. שתי השרשראות מרוחקות זו מזו 2,800–3,500 ק"מ (3,490 Majuro–Kiriritimati ק"מ; 2,810 Tarawa–Palmyra ק"מ; ממרכז למרכז 3,290 ק"מ): זהו רוחב הקצה (3,360 ק"מ, שנמדד בין שני הכיפופים של הפסים ב-C.1) ורוחב אזור המגע (3,000 ק"מ, רוחב המשטח שעליו ישב הירח בעת השחרור, מאמר 3). הפיזור של 2,800–3,500 ק"מ נובע ממדידה בין זוגות שונים של איים; כולו נמצא בתוך תחום רוחב הקצה שנמצא ב-C.1 (3,700–3,040 ק"מ).

שתי השרשראות אינן יושבות באופן סימטרי סביב טביעת הקצה שנמצאה מן הכיפופים (C.1). השרשרת המערבית עוברת דרך מרכזה (Kwajalein, באיי Marshall, נמצא 180 ק"מ ממנו); השרשרת המזרחית, Line Islands, עוברת מזרחה יותר ונושאת את Kiriritimati, במרכז בסיס האגס. הדבר מציב את השרשראות בתוך הבסיס, לא מחוצה לו: בסיס האגס היה ברוחב 9,000–11,000 ק"מ (מאמר 3), ולכן אזור הקצה כולו, בן 3,000 הק"מ, שירד כ-3,760 ק"מ מערבה ממרכז הבסיס (C.2), שוכן בתוך רוחב הבסיס, וכך גם שתי השרשראות. לזוג השרשראות יש רוחב אזור המגע, והוא שוכן כמחצית הרוחב הזה מזרחה מטיביעת הכיפופים. הדבר נובע מן המקום שבו נמשכו הרכסים. טביעת הכיפופים מסמנת את המגע הסופי בן 3,000 הק"מ, שעליו ישב הירח בעת השחרור; רכסי השפכטל שוכנים בתוך קצה האגס הרחב יותר, בחלקו שהתקלף — הרצועה שהתקלפה כשהמגע הצטמצם מ-6,000 ל-3,000 ק"מ (D.1) — ולכן בחלקם מעבר למגע הסופי, לעבר הבסיס. לכן השרשראות מוסטות מטיביעת הכיפופים לעבר הבסיס, בכמחצית רוחב המגע. כך נותנים הכיפופים של הפסים ושתי השרשראות שתי מדידות בלתי תלויות של רוחב אחד, רוחב אזור המגע.

D.3 הגילים שלהם

גילי החומר הוולקני לאורך שרשרת נותנים מבחן שני, וכדי לקרוא אותו נחוצים שני מונחים.

מסלול פלומה. פלומה היא עמוד של חומר חם העולה ממעמקי כדור הארץ אל נקודה קבועה מתחת לקרקעית. אם הקרקעית נעה לאט מעל הנקודה הזאת, הפלומה מתפרצת דרכה שוב ושוב במקומות חדשים ומשאירה שורה של הרי געש — בדומה לנר המוחזק במקומו מתחת לגיליון נייר הנמשך לאט מעליו ומשאיר שורה של סימני חריכה. הר הגעש החדש ביותר עומד מעל הפלומה; כל אחד מן הוותיקים יותר נישא הרחק יותר.

התקדמות גילים. לכן מסלול פלומה מראה שינוי קבוע של הגיל לאורכו: ככל שהר געש רחוק יותר מן הקצה הפעיל, כך הוא מבוגר יותר, ברצף מסודר. השינוי הקבוע הזה נקרא התקדמות גילים.

רכסי השפכטל לא נמשכו כלפי מעלה ברגע אחד: הם נמשכו במהלך ההתקלפות של הירח, לאורך כל משכה — מיליוני שנים (מאמר 3). לכן הגילים שלהם צריכים להתפרס על פני תקופת ההתקלפות, ולא להתרכז ברגע אחד. הם גם אינם אמורים ללכת אחר ההתקדמות הקבועה של מסלול פלומה: אין בתמונה הזאת מקור קבוע מתחת לקרקעית נעה, המשאיר הרי געש ההולכים ומזדקנים צעד אחר צעד לאורך השרשרת. לשרשרת שנמשכה כך יכולות להיות כמה אפיזודות, שכל אחת מהן נמצאת בבת אחת על פני מרחקים גדולים, או טווח ארוך של גילים בלי סדר פשוט לאורכה, אבל לא רצף נקי מקצה אחד לשני. לכן מה שמושווה כאן אינו ערך הגילים אלא הדפוס שלהם לאורך השרשרת. הגילים שפורסמו מובאים בטבלה שלהלן. הגילים נתונים במיליון שנה (Ma), *mega-* *annum*: מיליוני שנים לפני ההווה (Ma 81 פירושו לפני 81 מיליון שנה).

שרשרת	גילים	הקריאה בספרות
Line Islands	שתי אפיזודות, 81–86 ו-68–73 מיליון שנה (Ma), כל אחת מהן בו-זמנית על פני 1,200 עד יותר מ-4,000 ק"מ; אין התקדמות גילים	"אינו מתיישב עם מודלים של נקודה חמה אחת או של כמה נקודות חמות"; מתיחה של הליתוספירה (Davis et al. 2002); מקורות התכה מרובים (Pockalny et al. 2021)
Marshall Islands	66–140 מיליון שנה (Ma); אין התקדמות פשוטה; בכמה הרים תת-ימיים יש כמה אפיזודות	געשיות קצרת-מועד ולא רציפה (Koppers et al. 2003)
Hawaii–Emperor	התקדמות נקייה, מ-0 עד כ-81 מיליון שנה (Ma)	פלומה מתחת ללוח נע

כיצד לקרוא את הטבלה: העמודה האמצעית נותנת את דפוס הגילים לאורך כל שרשרת; העמודה השמאלית נותנת כיצד המחקרים שפורסמו מפרשים את הדפוס הזה בעצמם. "בו-זמני" פירושו בן אותו גיל: ב-Line Islands כל אפיזודה נמצאת בבת אחת לאורך 1,200 עד יותר מ-4,000 ק"מ של השרשרת. "נקודה חמה" (hot spot) היא הקצה העליון של פלומה, על פני השטח; "מתיחה של הליתוספירה" (lithospheric extension) היא מתיחה של הקליפה הקשיחה החיצונית של כדור הארץ.

את הטבלה יש לקרוא שורה אחת שורה. שרשראות Line ו-Marshall אינן מתנהגות כמסלולי פלומה: Line Islands התפרצו בשתי אפיזודות, כל אחת בבת אחת על פני אלפי קילומטרים, ואיי Marshall התפרצו על פני פרק זמן ארוך בלי סדר פשוט לאורך השרשרת. המדע עצמו מסביר את Line Islands במתיחה של הלוח — משיכה, לא דחיפה מלמטה. זהו אותו סוג של סיבה שתמונת השפכטל מציעה: שרשרת שנוצרה ממשיכת הקרקעית לצדדים, לא ממקור העולה מתחתיה. שרשרת Hawaii–Emperor אכן מראה התקדמות, מ-0 מיליון שנה ב-Hawaii ועד כ-81 מיליון שנה בקצה הרחוק של שרשרת Emperor. אנו מציעים, בזהירות, שגם היא הייתה חלק מן השפכטל; גיליה נדונים ב-F.3.

D.4 ההשוואה שעוד תיעשה

הגילים הם מבחן אחד. כדי להראות שהשרשראות נמשכו כלפי מעלה מלמעלה ולא נדחפו כלפי מעלה מלמטה, הן יושוו לרכסים מחוץ לאוקיינוס השקט שהספרות קוראת כבנויים מלמטה — רכס (Ninetyeast Kerguelen) — התרוממות רציפה באורך 5,000 ק"מ, גילים של 77 מיליון שנה בצפון עד 43 מיליון שנה בדרום), רכס Walvis (Tristan–Gough) ורכס Chagos–Laccadive (Réunion) — בגילים, בצורה, בתעלת הכפיפה, בשורש הקרום ובכיוון (חלק G). שלושת הרכסים האלה משמשים כנקודת הייחוס: אם שרשראות האוקיינוס השקט בנויות אחרת, ההבדל אמור להיראות באותן חמש מידות.

שתיים מן המידות האלה צריכות הסבר.

תעלת כפיפה (flexural moat). רכס וולקני גדול הוא עומס כבד העומד על הקרקעית. הקליפה החיצונית של כדור הארץ מתכופפת תחת עומס כזה, כמו קרש הצף על מים ושוקע במקום שבו מניחים עליו משקולת. סביב הרכס הקרקעית נלחצת למטה לשקע, המתמלא לאט במשקעים: השקע הזה הוא תעלת הכפיפה. עומקה ורוחבה מגלים כמה כבד העומס וכמה קשיחה הייתה הקליפה כשהעומס הונח עליה. הקרקעית סביב Hawaii היא המקרה הקלאסי שנמדד (Watts & ten Brink 1989).

שורש הקרום. מתחת לרכסים גדולים רבים הקרום עבה יותר מאשר בקרקעית שמסביב: לרכס יש שדרית הנמשכת כלפי מטה, כמו קרחון שרוב גופו נמצא מתחת לקו המים. הקרום המעובה הזה שמתחת לרכס הוא השורש שלו. רכס שנבנה מלמטה, מהתכה העולה דרך הקליפה, צפוי לשבת על שורש כזה.

ההשוואה שואלת האם לשרשראות האוקיינוס השקט יש תעלות הכפיפה והשורשים של רכסים שנבנו מלמטה, או שהן שונות מהם באופן שבו רכס שנמשך כלפי מעלה מפני השטח היה שונה. הערכים יימדדו במחקר 7; ההשוואה עוד לא נעשתה.

מה שיש בידינו עכשיו: שתי שרשראות רכסים שהמרחק ביניהן הוא רוחב אזור המגע, האחת עוברת דרך מרכז הקצה והאחרת ליד Kiriritimati, שתיהן בתוך רוחב הבסיס, ומוסטות כמחצית רוחב מטביעת הכיפופים לעבר הבסיס, בתוך הקצה עצמו, ברצועה שהתקלפה כשהמגע הצטמצם מ-6,000 ל-3,000 ק"מ; שתיים משלוש השרשראות בלי התקדמות הגילים של מסלול פלומה; ומערכת של מידות שבהן אפשר להבחין בין רכס שנמשך כלפי מעלה מלמעלה לבין רכס שנבנה מלמטה.

חלק E — קו המשווה של אז

חלקים A ו-B השתמשו בעובדה שהפסים הם קווי רוחב של קו משווה אחד. החלק הזה מראה כיצד נמצא קו המשווה הזה, בכמה הוא נוטה ביחס לקו המשווה של היום, ומה משמעות הנטייה: הפסים רושמים את קו המשווה של כדור הארץ בזמן שהאגס נאסף בחזרה, שאינו חייב להיות קו המשווה של היום.

E.1 הפסים נוטים ביחס לקו המשווה של היום

כל פס שנמדד עולה צפונה ככל שמתקדמים מזרחה, כולל הפס הדרומי: הפסים אינם מקבילים לקו המשווה של היום. אילו היו מקבילים, כל אחד מהם היה שומר על קו רוחב אחד לכל אורכו; במקום זאת, כל אחד נמצא צפונה יותר בקצהו המזרחי מאשר בקצהו המערבי.

הזווית נמדדה ישירות על הגלובוס, בין נקודות שהמחבר סימן לאורך כל פס. לשתי נקודות המדידה פשוטה: העלייה היא ההפרש בקו הרוחב בין הנקודה המזרחית למערבית, המרחק האופקי הוא המרחק מזרח-מערב ביניהן (ההפרש בקו האורך, מקוצר בקוסינוס של קו הרוחב, משום שקווי האורך מתקרבים זה לזה לעבר הקוטב), והזווית היא השיפוע של העלייה ביחס למרחק האופקי. לדוגמה, שתי הנקודות של Murray מרוחקות 4.04° זו מזו בקו הרוחב ו- 20.95° בקו האורך; בקו רוחב של כ- 31° זהו מרחק אופקי של כ-18 מעלות קשת, והשיפוע הוא 12.7° . במקום שבו סומנו יותר משתי נקודות (Clipperton, Clarion), הזווית היא זו של הקו הישר העובר דרך כולן.

פס	הנקודות שסומנו (ממזרח למערב)	זווית
Mendocino	$39.48^{\circ}\text{N}; 39.84^{\circ}\text{N } 129.66^{\circ}\text{W}$ 140.90°W	$+2.4^{\circ}$
Murray	$29.08^{\circ}\text{N}; 33.12^{\circ}\text{N } 134.36^{\circ}\text{W}$ 155.31°W	$+12.7^{\circ}$
Clarion	$19.44^{\circ}\text{N } 110.26^{\circ}\text{W} \dots 14.21^{\circ}\text{N}$ 145.97°W (4 נקודות)	$+9.0^{\circ}$
Clipperton	$10.16^{\circ}\text{N } 112.86^{\circ}\text{W} \dots 3.0^{\circ}\text{N } 150^{\circ}\text{W}$ (3 נקודות)	$+11.0^{\circ}$
הפס הדרומי	$12.63^{\circ}\text{S}; 10.23^{\circ}\text{S } 132.24^{\circ}\text{W}$ 144.09°W	$+11.7^{\circ}$

זווית: ביחס לקווי הרוחב של היום, חיובית כשהפס עולה לעבר המזרח. צבע תא הזווית מראה את גודלה: ככל שהכתום עמוק יותר, הזווית גדולה יותר. כל חמש הזוויות חיוביות: כל פס עולה לעבר המזרח.

כיצד לקרוא את הטבלה: יורדים לאורך העמודה של הזווית. ארבעה מתוך חמשת הפסים — Clarion, Murray — נוסעים ב- 9.0° עד 12.7° , והם נמצאים גם מצפון לבסיס וגם מדרום לו; Mendocino, Clipperton והפס הדרומי, שנמדד על פני המרחק הקצר ביותר, נוטה פחות מכולם (2.4°) אבל גם הוא עולה לעבר המזרח. אין פס אופקי, ואין פס היורד לעבר המזרח. לפסים כיוון נטייה משותף, ולרובם גם גודל נטייה משותף.

E.2 קו משווה אחד, בנטייה של 10° לפחות

קווים נוטים מן הסוג הזה הם מה שקווי הרוחב של קו משווה נוטה נראים על המפה של היום. קו משווה הנוטה ביחס לקו המשווה של היום חוצה אותו בשתי נקודות מנוגדות; קו המקביל לו עולה מעל קווי הרוחב של היום בצד אחד של נקודת החצייה ויורד מתחתם בצד האחר. סמוך לנקודת החצייה קו כזה עולה בערך בזווית הנטייה; רחוק יותר ממנה הוא עולה בהדרגה מתונה יותר, ובמרחק של רבע הדרך סביב הגלובוס הוא נע אופקית לזמן-מה לפני שהוא פונה כלפי מטה.

כשמתאימים אותם יחד, הפסים הם קווי רוחב של קו משווה אחד הנוטה ביחס לקו המשווה של היום ב- 10° לפחות; מתחת לזה ההתאמה נכשלת. הסיבה היא תלילות הפסים הנמצאים קרוב לקו המשווה של המערכת: קו הסמוך לקו משווה נוטה עולה לכל היותר בערך בזווית הנטייה, ולכן קו משווה הנוטה בפחות מ- 10° אינו יכול ליצור פסים כמו Clipperton (+ 11.0°) והפס הדרומי (+ 11.7°).

מעל הסף הזה, נטיות של עד כ- 20° מתאימות כמעט באותה מידה, משום שהנקודות משתרעות על פני כ- 55° של קו אורך בלבד — בערך שביעית מן הדרך סביב הגלובוס. על פני קטע קצר כל כך, קו משווה בנטייה מתונה הנראה קרוב לנקודת החצייה שלו וקו משווה בנטייה תלולה יותר הנראה רחוק יותר מנקודת החצייה שלו משרטטים קווים כמעט זהים; אפשר להבחין ביניהם רק אם עוקבים אחר הפסים על פני קשת ארוכה יותר. זו הסיבה שהמדידות קובעות גבול תחתון אבל לא את הערך שמעליו. הנטייה המדויקת תלויה בשאלה אם הנקודות המערביות ביותר, שמעבר לרכסים שבהם הפסים מתכופפים (B.6), עדיין שייכות לפסים הישרים: ממערב לרכסים הפסים מתכנסים, וקווי רוחב של קו משווה אחד אינם מתכנסים, ולכן הכללת הנקודות האלה או השמטתן משנה את ההתאמה.

בנטייה של 10° – 14° בסיס האגס נמצא על קו המשווה של המערכת (ההתאמה של 11° , מציבה את נקודת החצייה עם קו המשווה של היום ב- 159°W , 1.5° באורך גיאוגרפי מן הבסיס, ואת הבסיס 1.6° מקו המשווה של המערכת). לכך יש חשיבות משום שזה קושר את הפסים לאגס: האגס עלה מקו המשווה של זמנו (B.2), ובסיסו יושב על קו המשווה שהפסים מגדירים. הנטייה המדויקת נשארת למחקר 1, שיתאים מחדש את קו המשווה על שרטוטים של הפסים המלאים וייתן את שגיאותיו.

E.3 קו המשווה בזמן שהאגס נאסף בחזרה

מדוע שקו המשווה של הפסים יהיה שונה מזה של היום? התשובה נמצאת בשאלה מתי נוצרו הפסים. הפסים לא הונחו בזמן שהאגס עמד, אלא כשנאסף בחזרה, אחרי השחרור. עד אז עמדה מסה של שבע עד שתיים-עשרה מסות ירח גבוה מעל פני השטח בצד אחד של כדור הארץ, סמוך לקו המשווה. כשהירח נותק והלחץ שבתוך האגס השתחרר, האגס נאסף בחזרה לתוך כדור הארץ ונבלע בו — החלק הכבד שלו ירד עד בסיס המעטפת שמתחת לבסיס (B.7) — והבליעה השאירה את הקמטים: הפסים בצד הקדמי, והקשתות המקומטות בגב (B.8).

המסה לא עזבה את כדור הארץ; היא עברה מגובה רב בחוץ אל עומק רב בפנים, ופיזור המסה סביב ציר הסיבוב השתנה יחד איתה. גוף מסתובב נמצא באיזון כשהמסה שלו מסודרת באופן מסוים סביב צירו; הגודל המודד את הסיבוב הזה הוא מומנט ההתמד, הגדל עם כמות המסה ועם מרחקה מן הציר. העברה של מסה גדולה מהרחק מחוץ לפני השטח אל עומק הגוף משנה את הסיבוב הזה, ואת האיזון יחד איתו. התמונה היומיומית היא כדור מסתובב שגוש כבד של פלסטלינה מודבק גבוה על צד אחד שלו: הכדור מסתובב ביציבות כשהגוש על קו המשווה שלו. אם לוחצים את הגוש עמוק לתוך הכדור, האיזון הזה אובד; הכדור מתהפך לאט, ביחס לסיבוב שלו, עד שהוא מוצא איזון חדש. באותו אופן, כדור הארץ יכול היה אז להתחיל לפנות אל כיוון חדש.

לכן הפסים רשמים את קו המשווה בזמן שהאגס נאסף בחזרה, ואולי את תחילתה של הפנייה הזאת. נטייה של 10° לפחות בין קו המשווה של הפסים לקו המשווה של היום היא מה שפנייה כזאת הייתה משאירה אחריה.

הסדרה אינה נכנסת לחקר הצירים — בכמה כדור הארץ פנה, באיזו מהירות, וסביב איזה קו; הדבר נשאר לעבודה עתידית.

חלק F — אתגרים

קורא מומחה יעלה שלוש התנגדויות לקריאה של חלקים A–E. החלק הזה מציג כל אחת מהן ואת מה שהמודל משיב ודורש. הראשונה נוגעת לגיל הקרקעית שעליה מונחים הפסים, השנייה לסדר שבין הפסים לרכסים, והשלישית לגילי שרשרת Hawaii.

F.1 גיל קרקעית הים

ההתנגדות. הקרקעית שבין הפסים מתוארכת, לפי האנומליות המגנטיות שלה ולפי הבזלות שלה, לכל היותר לכ-180 מיליון שנה — צעירה בהרבה מן הניתוק של הירח. (אנומליות מגנטיות הן רצועות של הקרקעית שמוגנטו בכיוון זה או אחר, ורושמות את שדה כדור הארץ בזמן שהחומר התקרר; בזלות הן החומר הוולקני הכהה שממנו עשויה הקרקעית, ומתוארכת לפי השעונים הרדיואקטיביים שלהן.) פס שנוצר כשהירח עזב אינו יכול להימצא בקרקעית שנוצרה זמן רב אחר כך.

התשובה. במודל הקרקעית צעירה משום שהיא צברה שכבות: שכבה חדשה מונחת מלמעלה בעוד השכבה שמתחת נלקחת בחזרה ומתחדשת מלמטה. מה שמתוארך הוא החומר המונח כעת על הפסים — השכבה האחרונה — ולא הפסים. קרקעית המתחדשת באופן הזה אינה ניתנת לתיארוך כמכלול, וגיל פני השטח הנוכחיים שלה אינו גיל הפסים.

התמונה היומיומית היא שלג על שדה חרוש. השלג ירד אתמול בלילה; התלמים נחרשו לפני חודשים. מתחת לשלג קל התלמים עדיין נראים דרכו כקווים ארוכים וחיוורים, משום שהשלג מונח על התבליט הישן ועוקב אחר צורתו. תיארוך השלג נותן את מועד השלג, לא את מועד החריש. באותו אופן, שכבה שהונחה על קפל ישן יותר מקבלת את צורת הקפל, ותיארוך השכבה נותן את גיל השכבה, לא את גיל הקפל שמתחתיה. הפסים עצמם יכולים להיות בני מיליארדי שנים: שחוקים ומחוקים בחלקם במשך הזמן הזה, ונראים היום כשרידים מתחת לחומר חדש.

מה המפות מראות. בטופוגרפיה של הקרקעית הפסים חיוורים; בגרדיאנט הכבידה הם בולטים בחדות (איורים A.1, B.4, B.5). שתי המפות רואות דברים שונים. טופוגרפיה היא צורת פני השטח בלבד: במקום שבו שכבות חדשות החליקו תבליט ישן יותר, פני השטח מראים אותו בחיוורון. הכבידה של מקום תלויה בכל המסה שמתחתיו, וגרדיאנט הכבידה — הקצב שבו הכבידה משתנה מנקודה לנקודה — קולט שינויים חדים של צפיפות בעומק כמו גם על פני השטח. קפל של חומר צפוף יותר מתחת לשכבות קלות וצעירות יותר משנה את הכבידה שמעליו גם במקום שבו הוא כמעט אינו משנה את צורת פני השטח. הכבידה רואה את ניגודי הצפיפות שמתחת לפני השטח, הטופוגרפיה רק את פני השטח: הפסים ברורים יותר במקום שבו המפה רואה אל מתחת לחומר החדש, כפי ששרידים מתחתיו היו נראים. מודל הכבידה הגלובלי של הקרקעית תואר בעצמו כחושף "מבנה טקטוני קבור" (Sandwell et al. 2014).

מה זה דורש. הפסים חייבים להיות מבנה של השכבה שמתחת לפני השטח המתוארכים — קפל שהשכבות החדשות נפרשו עליו ולא יצרו אותו. במקום שבו פס נחצה בקידוח או בחתכים סייסמיים (חתכים של הקרקעית המתקבלים משליחת גלי קול כלפי מטה ורישום ההדים שלהם מן השכבות שמתחת), הקפל אמור להימשך אל מתחת לשכבות הצעירות ביותר, והשכבות שמעליו אמורות להיות דקות יותר מעל פסגותיו ועבות יותר בשקעיו — כמו שכבה שנפרשה על תבליט ישן. זה נבדק במחקר 9.

F.2 הסדר שבין הפסים לרכסים

ההתנגדות. אם הפסים עוברים מתחת לרכסים (B.5), ייתכן שייראה שהפסים מבוגרים מן הרכסים, או שהרכסים מבוגרים מן הפסים; את התצפית יש לקרוא בזהירות. העובדה שהפסים עוברים מתחת לרכסים אינה קובעת כשלעצמה מה בא קודם: ייתכן שהרכסים עמדו על פני השטח בזמן שהקימוט נוצר מתחתם. קפל שנוצר מן הצדדים ומלמטה (איור B.3) יכול לעבור מתחת לרכס שכבר עומד, כמו שטיח שאפשר לקמט מתחת לשולחן העומד עליו.

המבחן. המבחן הוא האם הרכסים מקוצרים במקום שבו הפסים עוברים מתחתם. אם קפל נוצר מתחת לרכס עומד, הקרקע שמתחת לרכס נמשכה פנימה, והרכס שמעליו אמור להראות זאת — מקוצר, דחוס או מכופף במקום שבו הקפל עובר. אם הרכס לא נפגע במקום שבו קפל בהכרח עבר מתחתיו, הרכס בא מאוחר יותר. זהו מחקר 6, שיימדד על מפה שטוחה בלי הגזמה אנכית.

F.3 התקדמות הגילים של Hawaii

ההתנגדות. לשרשרת Hawaii–Emperor יש התקדמות הגילים הנקייה של מסלול פלומה (D.3), מ-0 מיליון שנה ב-Hawaii ועד כ-81 מיליון שנה בקצה הרחוק של שרשרת Emperor, ורכסי השפכטל אינם אמורים להראות התקדמות כזאת.

התשובה. הקריאה של המאמר אינה נשענת על השרשרת הזאת. מה קרה איתה עוד אינו ידוע; אנו מציעים, בזהירות, שגם היא הייתה חלק מן השפכטל, והמאמר אינו מציב עליה שום דרישה. הקריאה נשענת על שרשראות Line ו-Marshall, שגיליהן אינם מראים התקדמות של פלומה (D.3). שרשרת Hawaii–Emperor מוצבת לצדן, ולצד הרכסים שנבנו מלמטה, במחקר 7.

חלק G — תחזיות, מבחנים והמחקרים שעוד ייעשו

החלק הזה מרכז את מבחני המאמר בטבלה אחת. כל שורה היא מחקר שעוד לא בוצע — מחקר 10 עבר הרצה ראשונה (C.5), והשורה שלו נותנת את הצעד הבא: העמודה האמצעית אומרת מה יש למדוד, העמודה השמאלית אומרת איזו תוצאה תתמוך בקריאה של הפסים כצדו הקדמי של האגס. המחקרים הולכים לפי סדר המאמר: קו המשווה (חלק E), סידור הפסים סביב הבסיס (חלק B), הרכסים (חלקים B ו-D), חותם המראה (חלק C), גיל הקרקעית (חלק F) והפסים של האוקיינוס השקט כולו (חלק C).

#	מחקר	תוצאה שתומכת בקריאה
1	קו המשווה של הפסים, מותאם מחדש על השרטוטים שלנו של הפסים המלאים: נטייה, נקודת חצייה, שגיאות	קו משווה משותף אחד, העובר דרך הבסיס
2	מבחן של מקריות: באיזו תדירות נקודה אקראית נופלת בטווח של $\pm 2^\circ$ מקו המשווה של המערכת	מיקום קרוב כל כך לקו המשווה נדיר לנקודה אקראית
3	צד אחד בלבד: האם הפסים מתחילים בבסיס ונמשכים מזרחה; מה נמצא ממערב לו	פסים המתחילים בבסיס ונמשכים מזרחה; כיפוף, התכנסות וקימוט ממערב לו
4	מדרגות בעומק ובגיל לרוחב כל פס: האם הן גדלות לעבר הבסיס או הרחק ממנו	מדרגות מסודרות סביב הבסיס
5	הצד האחורי: אסימטריה מזרח-מערב של האוקיינוס השקט סביב הבסיס	פסים מקבילים ממזרח, קשתות מקומטות ממערב
6	רציפות מתחת לרכסים: האם כל פס נמשך על אותו מעגל משני הצדדים; האם הרכס שמעליו מקוצר (מפה שטוחה, בלי הגזמה; קואורדינטות מן הסמן)	כל פס על אותו מעגל משני צדי הרכס; הרכס מקוצר מעליו
7	רכסי השפכטל מול רכסים שנבנו מלמטה מחוץ לאוקיינוס השקט (Chagos–Walvis, Ninetyeast Laccadive): גילים, צורה, תעלת כפיפה, שורש, כיוון	רכסי שפכטל הבנויים אחרת ממסלולי פלומה
8	חותם המראה: סימון התופעות במקומות המשתקפים של Serenitatis, Nectaris ומרכז המגע, ושל שאר הימות של הצד הקרוב, בקנה מידה 1.37	תופעות מעגליות במקומות החזויים

9	הפסים מתחת לשכבות המתוארכות: חתכים סייסמיים וקידוחים לרוחב הפסים — האם הקפל נמשך אל מתחת לשכבות הצעירות ביותר, האם השכבות דקות יותר מעל פסגותיו	הקפל נמשך אל מתחת לשכבות הצעירות ביותר, והשכבות דקות יותר מעל פסגותיו
10	הפסים של האוקיינוס השקט כולו אל הקצה (הרצה ראשונה ב-C.5): דיגיטציה מלאה של הפסים של הצפון, המרכז והדרום, ומבחן פורמלי מול מודל של מקריות	מסלולי הפסים מגיעים אל המגע הסופי לעתים קרובות יותר מקווים אקראיים באותם כיוונים, ויותר מקווים שלא שורטטו לעבר הקצה

מה כל מחקר יראה.

- **מחקר 1** יקבע את נטיית קו המשווה של הפסים, הידועה כעת רק כ- 10° לפחות ועד כ- 20° (E.2), ואת המקום שבו הוא חוצה את קו המשווה של היום, יחד עם שגיאותיהם. הוא יראה אם לפסים באמת יש קו משווה אחד משותף, ואם בסיס האגס נמצא עליו בנטייה המותאמת.
- **מחקר 2** יראה אם למיקום הבסיס על קו המשווה יש משמעות. לכל נקודה יש סיכוי כלשהו להימצא קרוב לקו נתון; המחקר מודד באיזו תדירות נקודה המוצבת באקראי באזור נופלת בטווח של $\pm 2^\circ$ מקו המשווה של המערכת. אם הדבר נדיר, מיקום הבסיס ב- 1.6° הוא התאמה בעלת משמעות; אם הוא נפוץ, אין לו משמעות.
- **מחקר 3** יראה שהפסים שייכים לצד אחד של הבסיס: שהם מתחילים באזור הבסיס ונמשכים מזרחה, הצד הקדמי, ושמה שנמצא ממערב לו הוא הכיפוף וההתכנסות של B.6 והגב המקומט של B.8, ולא אותם פסים הממשיכים.
- **מחקר 4** יראה אם הקרקעית משתנה במדרגות לרוחב כל פס — בעומק ובגיל — ואם המדרגות האלה מסודרות סביב הבסיס, גדלות לעברו או הרחק ממנו. סדר סביב הבסיס יקשור כל פס, אחד אחד, לאגס.
- **מחקר 5** יראה אם האוקיינוס השקט שונה ממזרח לבסיס וממערב לו: הפסים המקבילים של הצד הקדמי מול הקשתות המקומטות של הצד האחורי (B.3, B.8).
- **מחקר 6** יראה, על מפה שטוחה בלי הגזמה אנכית ועם מיקומים הנקראים מן הסמן, אם כל פס נמשך על אותו מעגל משני צדי הרכס, ואם הרכס שמעליו מקוצר. הוא הופך את הקריאה הראשונה של B.5–B.6 למדידה, ונותן את הסדר שבין הפסים לרכסים (F.2).
- **מחקר 7** יראה אם רכסי השפכטל בנויים אחרת מרכסים שהספרות קוראת כבנויים מלמטה: חמש המידות של D.4 — גילים, צורה, תעלת כפיפה, שורש וכיוון — זו לצד זו. הוא גם מציב לצדם את שרשרת Hawaii–Emperor, כדי לראות אם היא שייכת לרכסי השפכטל (F.3).
- **מחקר 8** יראה אם חותם המראה של C.3 נמצא על הקרקעית: אם נמצאות תופעות מעגליות במקומות שהמראה חוזה ל-Serenitatis, ל-Nectaris ולמרכז המגע, ולשאר הימות של הצד הקרוב, בקנה מידה 1.37 — ההגדלה של פני הירח כשישב על הקצה.
- **מחקר 9** יראה אם הפסים הם קפל ישן יותר מתחת לפני השטח המתוארכים (F.1): אם הקפל נמשך אל מתחת לשכבות הצעירות ביותר בחתכים סייסמיים ובקידוחים, ואם השכבות שמעליו דקות יותר מעל פסגותיו ועבות יותר בשקעיו.
- **מחקר 10** יהפוך את ההרצה הראשונה של C.5 למדידה מלאה: כל פס של האוקיינוס השקט עובר דיגיטציה לאורך כל מהלכו, ושיעור המסלולים המגיעים אל המגע הסופי מוצב מול קווים אקראיים שמתחילים באותם מקומות ובאותם כיוונים. הוא יראה אם ההתכנסות של הצפון, המרכז והדרום אל הקצה עומדת מעל מה שקווים מערביים על האוקיינוס השקט נותנים במקרה.

חלק H — מסקנות

הטבלה שלהלן מסכמת את המאמר. כל שורה היא תצפית אחת; הצבע בעמודה הראשונה הוא רמזור. **כיצד לקרוא אותו:** ירוק פירושו שהתצפית נמדדה ומתאימה לקריאה של המאמר; כתום פירושו שהיא נשענת על קריאה ראשונה, או על השוואה שעוד תיעשה, ותיבדק במחקרים של חלק G. העמודה השמאלית נותנת את הערך או את המצב של כל תצפית ואת הסעיף שבו היא מוצגת.

רמזור	תצפית	מצב
	הבסיס על קו המשוואה של מערכת הפסים	1.6° ממנו, ליד Clipperton (1.8°), בנטייה של 10°–14° (E.2)
	רוחב הקצה	נמדד: 3,360 ק"מ, מול אזור מגע של 3,000 ק"מ וכיפה של 3,650 ק"מ
	אורך הפסים	נמדד: 9,360 ק"מ מן הקצה עד הקצה המזרחי, מול גופו של האגס עצמו, עם אזור הקצה, באורך 8,890–9,000 ק"מ (C.4)
	הצד הקרוב על כדור הארץ	תמונת מראה ב-\$1.37 כש-Imbrium במקומו; Serenitatis ומרכז המגע בתוך הקצה
	הפסים מתחת לרכסים	נצפו בארבע נקודות חצייה
	הפסים של האוקיינוס השקט כולו מובילים אל הקצה	משורטטים על GEBCO 2026: כל עשרת המסלולים של הצפון, המרכז והדרום מגיעים אל אזור הקצה; שישה עוברים בטווח 1,500 ק"מ ממרכז המגע הסופי (166–1,274 ק"מ); אף אחד משלושת קווי הייחוס אינו עושה זאת (C.5)
	הצד האחורי	קשתות מקומטות ממערב לקצה, במרחק 8,100–10,300 ק"מ מן הבסיס (גוף האגס 8,890–9,000)
	התכנסות ממערב לרכסים	קריאה ראשונה במבטים אלכסוניים
	רכסי השפכטל	בתוך הקצה עצמו, ברצועה שהתקלפה כשהמגע הצטמצם מ-6,000 ל-3,000 ק"מ (D.2); Marshall ו-Line בלי התקדמות גילים של פלומה; Hawaii– Emperor, עם התקדמות כזאת, אולי חלק מן השפכטל; ההשוואה עוד תיעשה

פני השטח המתוארכים הם השכבה האחרונה; הפסים הם קפל ישן יותר מתחתיה (F.1) — ייבדק בחתכים סייסמיים	גיל קרקעית הים
--	-----------------------

שש השורות הירוקות הן הגאומטריה של המאמר: בסיס האגס נמצא על קו המשווה של הפסים, לקצה יש רוחב אזור המגע, לפסים יש אורך גופו של האגס עצמו, הצד הקרוב של הירח נופל בתוך הקצה כתמונת מראה, הפסים עוברים מתחת לרכסים בלי להישבר, והפסים של האוקיינוס השקט כולו, צפון, מרכז ודרום, מובילים אל הקצה. ארבע השורות הכתומות הן התצפיות הממתינות למחקרים של חלק G: גב האגס, התכנסות הפסים ממערב לרכסים, טבען של שרשראות הרכסים, והפסים מתחת לקרקעית המתוארכת.

הפסים של צפון האוקיינוס השקט מסודרים סביב בסיס האגס: הוא נמצא על קו המשווה שלהם, הם נמשכים ממזרח לו, וממערב לו הם מתכופפים ומתכנסים לעבר אזור ברוחב אזור המגע שעליו ישב הירח; כשמשרטטים אותם בנתונים, הפסים של המרכז והדרום של האוקיינוס השקט מובילים אל אותו אזור. בתוך האזור הזה נמצא חותם המראה של הצד הקרוב, בקנה המידה של ירח שעוד לא התכווץ, ושרשראות הרכסים מרוחקות זו מזו כרוחב אזור המגע ושוכנות בתוך הקצה עצמו, ברצועה שהתקלפה כשהמגע הצטמצם, בחלקן מעבר למגע הסופי לעבר הבסיס. אנו קוראים את הפסים כצדו הקדמי של האגס, שקומט כשנאסף בחזרה, ואת אזור הכיפופים כמקום שבו נוצר הירח.

בתמונה אחת: אגס מחומרו של כדור הארץ עצמו עמד על האוקיינוס השקט, בסיסו סמוך ל-Kiritimati וקצהו כ-3,760 ק"מ מערבה, מפגר אחר סיבוב כדור הארץ, והירח על הקצה הזה. חזיתו, הפונה אל כיוון הסיבוב, נמתחה. כשהירח נותק והלחץ השתחרר, האגס נאסף בחזרה לתוך כדור הארץ: הדופן הקדמית שלו נמרחת לאורך הקרקעית מזרחה לעבר אמריקה, בכיוון הסיבוב, כפסים — 9,360 ק"מ מהם, מול גוף אגס של 8,890–9,000 ק"מ; גבו התקמט אל הקשתות של מערב האוקיינוס השקט; הירח, שהתקלף מן המגע כשהצטמצם מ-6,000 ל-3,000 ק"מ ונמשך ממנו בכוח, משך כלפי מעלה את שרשראות הרכסים בתוך הקצה עצמו, ברצועה שהתקלפה, במהלך ההתקלפות, במרחק 2,800–3,500 ק"מ זו מזו, והן ירדו אל הקרקעית עם הקצה כשהאגס נאסף בחזרה; ופני הירח השאירו את תמונת המראה שלהם על הקרקעית בקנה מידה 1.37. הפסים רושמים את קו המשווה של אז, הנוטה ב-10° לפחות ביחס לקו המשווה של היום. המחקרים של חלק G יבחנו זאת.

- Cottaar, S. & Lekic, V. (2016). Morphology of seismically slow lower-mantle structures. *Geophys. J. Int.* 207, 1122–1136 •
- Davis, A.S., Gray, L.B., Clague, D.A. & Hein, J.R. (2002). The Line Islands revisited: new $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ geochronologic evidence for episodes of volcanism due to lithospheric extension. *Geochem. Geophys. Geosyst.* 3 •
- GEBCO Compilation Group (2026). *GEBCO 2026 Grid*. General Bathymetric Chart of the Oceans •
(IHO–IOC)
- Koppers, A.A.P., Staudigel, H., Pringle, M.S. & Wijbrans, J.R. (2003). Short-lived and discontinuous intraplate volcanism in the South Pacific: hot spots or extensional volcanism? *Geochem. Geophys. Geosyst.* 4 •
- Pockalny, R., Barth, G., Eakins, B., Kelley, K.A. & Wertman, C. (2021). Multiple melt source origin •
of the Line Islands (Pacific Ocean). *Geology* 49, 1358–1362
- Sandwell, D.T., Müller, R.D., Smith, W.H.F., Garcia, E. & Francis, R. (2014). New global marine •
gravity model from CryoSat-2 and Jason-1 reveals buried tectonic structure. *Science* 346, 65–67
- Watts, A.B. & ten Brink, U.S. (1989). Crustal structure, flexure, and subsidence history of the •
Hawaiian Islands. *J. Geophys. Res.* 94, 10473–10500
- Duran, Z. Papers 3 and 8 of this series (2026) •