

THE LEF MODEL · A SERIES OF TWELVE PAPERS

Lunar Elevation & Fission

5. הימות

פתחים מעל כיפות הזנה

חלקים 646 · A-O יחידות ממופות · 73 כיפות הזנה בכבידה

זהר דוראן

חוקר עצמאי, רמלה, ישראל

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

תרגום מלא לעברית של המאמר האנגלי · 15 באוקטובר 2026

הסביבה החישובית

המאמר הזה מודד את הימות של הירח של היום וקורא אותם דרך הבנייה שתוארה במאמרים הקודמים בסדרה. לכן יש לקבוע שני דברים לפני שקוראים מדידה כלשהי: לאיזה שלב של הבנייה מתייחסת כל טענה, ומאילו נתונים לקוח כל מספר. הטבלה שלהלן קובעת את שניהם. השורות העליונות שלה מזכירות את הגאומטריה של הבנייה (מאמר 3); השורות התחתונות מציינות את מפות הבזלת, הכבידה, הכימיה, המכתשים והגובה שעליהן נעשה כל מחקר במאמר.

גודל או תנאי	ההגדרה במאמר הזה
שלב הבנייה	הגוף היושב על קצה האגס של כדור הארץ ומוזן מבפנים, לאורך שלושת השלבים של מאמר 3: ההתעגלות החוצה, הפחיסות וההתעגלות פנימה; ואחריהם השחרור
קצה האגס	ברוחב 6,000 ק"מ בתחילת ההתעגלות ו-3,000 ק"מ בשחרור; בסיס האגס ברוחב 9,000–11,000 ק"מ (מאמר 3)
הגבעה והמגע	הגבעה, בסיס הבליטה, ברוחב 6,000 ק"מ, שמרכזה היום ב-16.6° צפון, 13.1° מזרח; המגע, 3,000 הק"מ האחרונים, שמרכזו ב-24.1° צפון, 335.2° מזרח (מאמר 3, B.4§)
אזורי החשיפה	לפי כלל החלק היחסי: כיפה בצד הקרוב של 31°, חגורה מ-31° עד 70°, ודיסקת המגע (מאמר 3, B.4§)
חצי מוביל וחצי נגרר	המוסכמה המקובלת: מרכז החצי המוביל ב-90° מערב, מרכז החצי הנגרר ב-90° מזרח
השוואות	זהה מול זהה: הימות מוסרים משני צדי כל השוואה של הקרקע, והדבר נאמר במפורש
מפת הבזלת	מפת הימות הגלובלית של LROC, 644 מצולעים המקובצים ב-646 יחידות תחת 97 שמות [S1]
כבידה	GRAIL GRGM1200L Bouguer, דרגות 6–660, צפיפות קרום 2,550 ק"ג/מ"ק [S2]
כימיה	TiO ₂ -i Kaguya Multiband Imager, FeO, כ-240 מ' [S3]; תוריום של Lunar Prospector, כ-60 ק"מ [S4]
מכתשים	Robbins (2019), 20 ק"מ ומעלה [S5]; Wang & Wu (2021), ק"מ אחד ומעלה [S6]
טופוגרפיה	SLDEM2015, כ-60 מ' [S7]

טבלת הסביבה החישובית של מאמר 5.

כמה שורות דורשות מילת הסבר. **הבנייה**. במודל LEF הירח לא הושלך מוגמר: הוא נבנה כגוף שעמד על כדור הארץ, יושב על קצה של המשך ארוך מחומר של כדור הארץ עצמו, האגס, ומוזן מבפנים דרך פתחים במעטפת שלו. מאמר 3 עוקב אחר הגוף הזה לאורך שלושה שלבים — הוא התעגל החוצה מצורה מעוכה לכדור, נפחס על ידי הסיבוב, והתעגל פנימה שוב כשהפחיסות נרגעה והוא נעשה צפוף יותר — ובשחרור הוא היה עגול והמעטפת החיצונית שלו קשיחה. הבנייה כולה, מתחילת הבליטה ועד השחרור לפני 3.873 מיליארד שנה, נמשכת כ-600 מיליון שנה: בערך 400 לבליטה ולאגס, כ-100 לפחיסות וכ-100 עד השחרור. הימות של המאמר הזה פעלו

בשליבים שונים שלה: רוב פתחי הצד הרחוק מוקדם, עד שנאטמו כשהאגס גדל ופחות מחום כדור הארץ הגיע אליהם (Moscoviense, שהוזן מ-Serenitatis, הוא היוצא מן הכלל); פתחי השוליים לאורך זמן רב; והימות של הצד הקרוב, שדרכם עבר הלחץ של כדור הארץ אל הירח, עד השחרור.

הגבעה והמגע. החלק של הגוף שישב על קצה האגס רשום על הירח של היום כשני אזורים מקוננים בצד הקרוב. הגבעה היא בסיס הבליטה, 6,000 הק"מ של החלק התחתון של הגוף שנחו על הקצה כשההתעגלות החלה. המגע הוא 3,000 הק"מ האחרונים שלה, הכתם שעדיין נגע בכדור הארץ בשחרור. שניהם נתונים לפי מרכייהם על הירח של היום; 335.2° מזרח זהה ל- 24.8° מערב, כך שהמגע נמצא צפונית-מערבית למרכז הצד הקרוב. דיסקת המגע, העיגול ברדיוס 1,500 ק"מ סביב מרכז המגע, משמשת לאורך המאמר כאזור שנגע בכדור הארץ אחרון.

אזורי החשיפה. כשהגוף התעגל, כל חלק בפני השטח שלו שמר על חלקו בשלם, כפי שכל כתם על כדור פחוס מעט שומר על חלקו כשהכדור נעשה עגול; זהו כלל החלק היחסי. הכלל מעביר את אזורי הגוף שעל האגס אל הירח של היום כזוויות הנמדדות ממרכז הצד הקרוב: בתוך 31° נמצאת הקרקע שהייתה מכוסה עד השלב האחרון, בין 31° ל- 70° הטבעת שהתקלפה מכדור הארץ במהלך ההתעגלות החוצה, ומעבר ל- 70° הכיפה העליונה, שהייתה חשופה מההתחלה. האזור שבו נמצא ים מגלה כמה זמן הוא עמד פתוח לחלל וכמה זמן נשאר מכוסה (חלק ו).

חצי מוביל וחצי נגרר. הירח מפנה פנים אחד אל כדור הארץ, ולכן חצי אחד שלו פונה תמיד קדימה לאורך המסלול (החצי המוביל) והחצי האחר אחורה (החצי הנגרר). שני החצאים פוגשים את החומר החוזר באופן שונה, וזה חשוב לספירת המכתשים (מאמר 6).

השוואות. כל השוואה של הקרקע במאמר נעשית זהה מול זהה. בימות יש הרבה פחות מכתשים מאשר ביבשה שסביבם, ולכן השוואה שהייתה משאירה אותם בצד אחד ולא בצד האחר הייתה מודדת את הימות ולא את הקרקע; לכן הם מוסרים משני הצדדים, וכל השוואה אומרת זאת.

הנתונים. מפת הבולת של מצלמת Lunar Reconnaissance Orbiter Camera (LROC) משרטטת את גבולותיו של כל מישור כהה של בזלת על הירח; זו מפת הימות של הספרות, והמאמר קורא אותה יחידה אחר יחידה. הכבידה לקוחה ממשימת GRAIL. מפת Bouguer היא שדה הכבידה לאחר שהוסרה ממנו המשיכה של התבליט הנראה, בהנחה של קרום בצפיפות 2,550 ק"ג/מ"ק; מה שנשאר מראה היכן החומר שמתחת לפני השטח צפוף או קל יותר מהקרום הזה. השדה בנוי מרכיבים בעלי פירוט הולך וגדל, הנקראים דרגות; הנמוכות ביותר, שמתארות את צורת הירח כולו, מושמטות, והגבוהה ביותר שנשמרת, 660, קובעת את הפרט העדין ביותר שאפשר לראות. הכבידה נמדדת במיליגל (mGal), מאית-אלפית של מטר לשנייה בריבוע. הכימיה נקראת ממסלול: ברזל וטיטניום כתחמוצות FeO ו-TiO₂, באחוזי משקל (%wt), מה-Kaguya Multiband Imager, ותוריום, בחלקים למיליון (ppm), מקרני הגמא שנספרו על ידי Lunar Prospector. המכתשים לקוחים משני קטלוגים גלובליים, אחד שלם מ-20 ק"מ ואחד מק"מ אחד, והגובה ממודל SLDEM2015. הגדלים הנתונים לכל מפה — 240 מ', 60 ק"מ, 60 מ' — הם הפרט העדין ביותר שהיא מבחינה בו.

תוכן העניינים

- הסביבה החישובית; תקציר; מבוא — הספרות והמודל; מה המאמר מציע
- **PART A** — מונחים והגדרות
 - A.1 — פתח, ים, אגן וכיפת הזנה
 - A.2 — המקור אינו מקום הנחיתה
- **PART B** — מה שהסדרה קבעה
 - B.1 — ממאמר 3: הגוף על האגס
 - B.2 — ממאמר 6: החומר החוזר
 - B.3 — המספרים הנעולים
- **PART C** — הימות: מהו ים, כמה ימות יש, והים כמקור
 - C.1 — הים בספרות
 - C.2 — הים במודל
 - C.3 — הספירות, לפי כל הגדרה
 - C.4 — מה מפריד בין הספירות
 - C.5 — התאמת הימות לכיפות ההזנה
 - C.6 — מה ההבדל בהגדרה מסביר
 - C.7 — מבחן המקור
 - C.8 — הציפוי והמכתש
 - C.9 — הרוחב והצורה של ההילה
 - C.10 — רשומת המכתשים סביב הפתחים
- **PART D** — הפתחים, הגלויים והקבורים
 - D.1 — מפת הפתחים
 - D.2 — אגן או מכתש, לפי מה שמתחת
 - D.3 — Procellarum, מישור בזלת
 - D.4 — כיפות ההזנה הקבורות
 - D.5 — מה מונח עליהן
 - D.6 — אופיו של פתח לפי האזור שלו
 - D.7 — פתחי יציאה ופיות
- **PART E** — כיפת ההזנה
 - E.1 — כיפת ההזנה שמתחת לכל ים
 - E.2 — המרכז שקע מעל הכיפה
 - E.3 — מדוע הקרקעית שוקעת
- **PART F** — הקרקעית, הקרקעיות והמפזר האחרון
 - F.1 — קרקעית אחת
 - F.2 — שוליים מתוחים, פנים לחוץ

◦ F.3 — השוליים: שכבות של מכתשים

◦ F.4 — הקרקעיות לפי אזור

◦ F.5 — מכתשים על הקרקעיות

◦ F.6 — סדר הקפיאה, והמפזר האחרון

• **PART G** — גודל ומצב: הימות והמכתשים בזמן

◦ G.1 — שלושה מצבים על קרקעית אחת

◦ G.2 — מצב המכתשים לפי גודל

◦ G.3 — הימות: טמפרטורה, צמיגות וזמן

◦ G.4 — החומר המגיע: טמפרטורה, גודל ומרחק

◦ G.5 — השרשרת בזמן

◦ G.6 — מישורי המגע: חום מלמטה, והשפה

◦ G.7 — מה זה מראה

• **PART H** — המנוע

◦ H.1 — לחץ, ציפה וצמיגות

◦ H.2 — חומרים נדיפים

◦ H.3 — שטף, דעיכה והשטף הקריטי

◦ H.4 — החום של כדור הארץ

• **PART I** — הגאומטריה של החשיפה, והדורות

◦ I.1 — חזית החשיפה הנעה

◦ I.2 — מפייה מכוסה ליציאה חשופה

◦ I.3 — חשיפה הדרגתית בתוך ים אחד

◦ I.4 — שלושה דורות

◦ I.5 — מה עשו הימות בכל שלב

◦ I.6 — גודלו של פתח כזיכרון

• **PART J** — כימיה

◦ J.1 — טבעות של ברזל וטיטניום

◦ J.2 — הכרונולוגיה של הברזל

◦ J.3 — התוריום מוחזק על ידי המגע

◦ J.4 — בתוך המגע: הימות, המישורים והרמה

◦ J.5 — לפי קו אורך

◦ J.6 — כיצד המודל קורא את התוריום

◦ J.7 — המסה הזרה של אגני הימות

• **PART K** — תיארוך

◦ K.1 — חמישה שעונים

◦ K.2 — הסדר היחסי של הימות

• **PART L** — סטטיסטיקה

◦ L.1 — נתונים ומסכות

◦ L.2 — שחזור

◦ L.3 — התוצאות שנמדדו, בטבלה אחת

• **PART M** — תחזיות ומבחנים

◦ M.1 — מה המדידות שינו

◦ M.2 — המחקרים בטבלה אחת

◦ M.3 — תחזיות ומבחנים

• **PART N** — דיון

◦ N.1 — התמונה המאוחדת

◦ N.2 — הסברים לספרות

◦ N.3 — מה קיים ומה חדש

• **PART O** — מסקנות

◦ O.1 — מה המאמר הראה

• עבודה להמשך — פתחים למחקר; זמינות הקוד; מקורות; נספח A — קטלוג הפתחים

תקציר

מהו ים. במודל LEF הירח נבנה על כדור הארץ והזון מבפנים דרך פתחים במעטפת שלו. המאמר הזה מציג שהימות הם הפתחים האלה. כל אחד מהם עומד מעל *כיפת הזנה*: גוף שנדחף מעלה ממוקד תת-קרקעי והרים את הקרקע שמעליו. דרך רוב הפתחים עלה החומר, הושלך החוצה, וחזר כחומר החוזר שיצר את המכתשים; Serenitatis ו-Imbrium, הימות של המגע, העבירו חומר ואת הלחץ של כדור הארץ אל הירח ולא השליכו (Serenitatis רק פצפוצים קלים). המישור הכהה של הבזלת הוא רק מה שנשאר על פני השטח של פתח כזה, השכבה האחרונה שלו שקפאה.

כשסופרים אותם כפתחים, הימות אינם במקום שבו נמצאת הבזלת. כיפת הזנה צפופה ומושכת חזק יותר מהקרקע שסביבה, ולכן בשדה הכבידה של GRAIL, לאחר הסרת המשיכה של התבליט (שדה Bouguer), היא מופיעה כשיא עגול. מתוך 73 שיאים כאלה של 100 ק"מ ומעלה, 25 נמצאים מתחת לים פתוח ו-44 מתחת לרמה בהירה, 36 מהם בצד הרחוק. מעל הכיפות הקבורות האלה הברזל והתוריום שווים לאלה של היבשה שמסביב והקרום עבה ב-8–13 ק"מ: שכבות מאוחרות כיסו אותן. ו-33 מתוך 34 הימות שזוהו על גרדיאנטי הכבידה יושבים על כיפה.

הקרקעית. כל קרקעית שומרת על מפלס אחד, כמו אגם קפוא, מתחת לשפה שלה בחציון של 3.4 ק"מ. הימות של המגע, האזור שנגע בכדור הארץ עד השחרור, נמצאים במפלס המישורים שלצידם; הימות הרחוקים נמצאים עמוק מתחת לקרקע שסביבם, בתוך צווארון מוגבה שבנוי מהחומר החוזר שלהם עצמם. בימות הפתוחים המרכזי נמוך מהשוליים ב-10 מתוך 12, ויותר ככל שהכיפה שמתחת חזקה יותר ($\rho = -0.59$).

המקור. הקרקע סביב שישה ימות נושאת את הברזל שלהם, שיורד מ-6.9 ל-3.1 אחוזי משקל FeO בתוך 150 ק"מ ונשאר מעל הרמות הרחוקות עד 600 ק"מ, והמכתשים שבה עניים יותר מהקרקע שלהם; לצד המישורים, שההתך שלהם נשפך מעבר לשוליהם, העודף יורד לרמה של הרמות הרחוקות. קרקעיות הימות הפתוחים נושאות חלק אחד משתי-עשרה מהמכתשים של 2–5 ק"מ שביבשה שסביבן, והנקיים ביותר הם הימות של המגע. דיסקת המגע, 17.5% מפני השטח, מחזיקה 95% מהתוריום שמעל 3 ppm, ומרכזה, שנקבע מראש, הוא השלישי מתוך 16,200 מרכיבים אפשריים; בתוכה הימות הם הקרקע העניה ביותר,

משום שהניחו לתוריום שלהם לשקוע חזרה עם אחרון ההתך. אילו נקראו אגני הימות כאגנים של גופים פוגעים חיצוניים, הם היו משאירים מסה זרה שההתכים שלהם אינם נושאים.

החלקים. A מגדיר את המונחים B-I מזכיר את מה שהסדרה קבעה; C סופר את הימות לפי כל הגדרה וקורא את הקרקע שסביבם כחומר שהם השליכו; D ממפה את הפתחים, הגלויים והקבורים; E מודד את כיפת ההזנה F-I את הקרקעית; G עוקב אחר הימות והמכתשים בזמן; H נותן את המנוע I-I את סדר החשיפה; J ו-K קוראים את הכימיה ואת השעונים; L מרכז את התוצאות שנמדדו M-I את התחזיות ואת המבחנים שלהן; N ו-O דנים ומסכמים.

מה פירוש התקציר, במילים פשוטות. הספרות והמאמר הזה מסתכלים על אותם מישורים כהים וקוראים בשם לדברים שונים. בספרות הים הוא המישור הכהה. במאמר הזה הים הוא המבנה שמתחתיו: חור דרך מעטפת הירח מעל גוף צפוף, שדרכו עלה חומר מהעומק, וברוב הפתחים הושלך החוצה, והמישור הכהה הוא העור האחרון שקפא מעל החור הזה כשהזרימה פסקה. אגם לבה בלוע הר געש הוא תמונה הוגנת: מה שרואים הוא קרום קפוא, אבל הקרום אינו הר הגעש; מתחתיו נמצא האזור הנוזלי שדרכו עבר הלחץ שהזין אותו. כשקוראים את הים כך, ים אינו חייב לשאת בזלת כלל, וכתם של בזלת אינו חייב להיות ים.

מה הכבידה מראה. גוף צפוף מסביבתו מושך חללית חולפת מעט חזק יותר, ו-GRAIL מיפתה את המשיכה העודפת הזו על פני הירח כולו. כיפת הזנה, שקפאה לגוף צפוף ועשיר בברזל, מופיעה כשיא עגול. מתוך 73 השיאים שנספרו, 25 נמצאים מתחת למישור כהה, 4 מכוסים בחלקם, ו-44 נמצאים מתחת לקרקע בהירה רגילה — ורובם בצד הרחוק. אלה הם הפתחים של הצד הרחוק, שנקברו תחת השכבות שבנו מאוחר יותר את הקרום העבה שלו. פני השטח מעליהם נושאים את אותו ברזל ואותו תוריום כמו היבשה שמסביב, משום שהם הם היבשה שמסביב: הכיסוי שנפרש מעל הכול. הקרום מעליהם עבה ב-8–13 ק"מ מאשר מעל כיפה פתוחה באותה עוצמה, וזה העובי של אותו כיסוי. גרדיאנטי הכבידה — עד כמה מהר המשיכה משתנה ממקום למקום — חדים ביותר בשולי גופים צפופים; עליהם זיהה המחקר 34 ימות, ו-33 מהם יושבים על אחת מ-73 הכיפות. היוצא מן הכלל היחיד, Ingenii, נמצא מעל South Pole–Aitken, שם החום שמתחת לאגן הזה בישל את הכיפה שלו עד שנעלמה (C.5§).

מה הקרקעית מראה. קרקעית שנמצאת במפלס אחד לכל אורכה קפאה כפי שאגם קופא: משטח נוזלי אחד שקפא לאט, מבחוץ פנימה, ולא ערימה של זרימות נפרדות. היא נמצאת קילומטרים אחדים מתחת לשפה שלה, והמרכז שלה שקע מעל הגוף הצפוף שמתחתיה: מתוך 12 ימות פתוחים, ב-10 המרכז נמוך מהשוליים. מתאם הדירוג ρ נע בין -1 ל-+1 ומודד עד כמה בעקביות שני גדלים עולים או יורדים יחד; -0.59 אומר שכיפה חזקה יותר באה, בעקביות סבירה, עם מרכז נמוך יותר. מבין הימות של המגע, Serenitatis קפא ראשון, קרוב מאוד לכדור הארץ, ו-Imbrium אחרי הניתוק, כשהירח התרחק; שניהם נמצאים במפלס אחד עם המישורים שלצידם; הימות הרחוקים יותר נמצאים עמוק בתוך צווארון שבנוי ממה שהם עצמם השליכו.

מה הכימיה מראה. אם הימות השליכו את החומר שיצר את המכתשים, היבשה סביב כל ים חייבת לשאת את הברזל שלו, הרבה ממנו בקרבת מקום ופחות הרחק יותר — והיא אכן נושאת אותו, מ-6.9 אחוזי משקל של תחמוצת ברזל ליד השוליים ועד 3.1 ב-150 ק"מ, ועדיין מעל הרמות הרחוקות ב-600 ק"מ. מכתש שנוצר מאוחר יותר בקרקע הזו השליך הצידה את הציפוי העשיר בברזל וחשף את הבסיס העני יותר, ולכן הוא עני יותר מהקרקע שלו עצמו. המישורים הכהים ללא כיפת הזנה מתנהגים אחרת: ההתך שלהם נשפך מעבר לשוליהם ולא הגיע רחוק. התוריום, יסוד רדיואקטיבי שהספרות מייחסת לשארית האחרונה של אוקיינוס מאגמה, מרוכז כמעט כולו בדיסקת המגע: שישית מפני השטח מחזיקה 95% ממנו. מרכז המגע נקבע במאמר 3 לפני שהתוריום נקרא; כשמציבים דיסקה באותו גודל בתורה על 16,200 נקודות על פני הירח כולו, המרכז שנקבע לו כד יותר תוריום מכולן מלבד שתיים (J.3§).

מה המכתשים על הקרקעיות מראים. ים פתוח מחזיק או מתיך את מה שנוחת עליו ואינו שומר רשומה כל עוד הוא פעיל; הקרקעית שלו אוספת מכתשים רק לאחר שקפאה. הקרקעיות נושאות חלק אחד משתים-עשרה מהמכתשים הקטנים של היבשה שסביבן, והימות של המגע, שקפאו מאוחר, נושאים את המעטים ביותר. ולבסוף, אילו אגני הימות היו נחפרים על ידי גופים מבחוץ, הגופים האלה היו משאירים את המסה שלהם בקרום; ההתכים של האגנים אינם נושאים אותה (J.78).

מבוא — הספרות והמודל

הספרות קוראת ים כשני אירועים. תחילה גוף פוגע חיצוני חופר אגן; מאות מיליוני שנים לאחר מכן בזלת עולה מהמעטפת הפנימית של הירח (ה-mantle) ומציפה אותו. המישורים הכהים הם הבזלת, האגנים הם החורים, והשניים נספרים בנפרד: אגן ללא בזלת אינו ים, וכתם של בזלת על קרקעית מכתש הוא ים. החום שיצר את הבזלת ממוקם באזור Procellarum, שבו מרוכז החומר הרדיואקטיבי KREEP. KREEP קרוי על שם האשלגן (K), יסודות האדמה הנדירים (REE) והזרחן (P) שבו; הוא עשיר בתוריום ובאורניום, שהתפרקותם משחררת חום, והספרות קוראת אותו כנוזל האחרון שנשאר כאשר אוקיינוס מאגמה גלובלי התגבש.

הטבלה מציבה את שתי הקריאות זו לצד זו, שאלה אחר שאלה. כל שורה היא מקום שבו אותה תצפית מקבלת משמעות שונה; שאר המאמר עובר על השורות אחת אחת ומודד איזו משמעות הנתונים נושאים. המסקון של השורה השלישית, "ריכוז מסה" (mass concentration), הוא עודף הכבידה שנמצא מתחת לימות הגדולים של הצד הקרוב.

שאלה	הספרות	המודל
מהו ים	מישור כהה של בזלת הממלא אגן	פתח מעל כיפת הזנה; הבזלת היא פני השטח האחרונים שלו
האגן	נחפר על ידי גוף פוגע חיצוני	שפת הפתח, שהורמה על ידי ההתזה
המסקון	התרוממות המעטפת הפנימית (mantle) ועומס הבזלת	כיפת ההזנה, שקפאה לגוף צפוף ועשיר בברזל
החום	KREEP מתחת ל-Procellarum	כדור הארץ, שהצד הקרוב פנה אליו בזמן החיבור
הצד הרחוק	מעט ימות	יותר כיפות הזנה מאשר בצד הקרוב, 40 לעומת 33, קבורות תחת השכבות שלו
הקרקעיות החלקות	בזלת צעירה, מעט פגיעות מאז	חמות ובעלות צמיגות נמוכה בשחרור; קפאו לאט אחריו, לאחר שרוב החומר החוזר כבר נחת
התוריום	שארית אוקיינוס המאגמה	הסימן של המגע, האזור האחרון שהרפה
הגילים	זמן ההתפרצות	זמן ההתקררות

שתי הקריאות של הימות, שאלה אחר שאלה.

מודל LEF קורא את אותם מישורים כמבנה אחד. הירח נבנה על כדור הארץ, הוזן מבפנים דרך פתחים, והימות שלו הם הפתחים האלה. כל אחד מהם עומד מעל כיפת הזנה — הגוף שדרכו עלה החומר — והבזלת היא האחרון ממה שעבר דרכו. לכן השאלה של המאמר אינה מדוע יש בזלת באגנים, אלא מהו ים, כמה ימות יש, ומה כל אחד מהם רושם על מערכת ההזנה שבנתה את הירח.

הדבר משנה את מה שנחשב לראיה. אם הימות הם פתחים, ים מזוהה לפי הגוף הצפוף שמתחתיו, ולא לפי צבע פני השטח שלו; היבשה שסביבו חייבת לשאת את החומר שהשליך; הקרקעית שלו חייבת להיות קפאה כמשטח אחד לאחר שהמכתשים שסביבה נוצרו; והגיל שלו הוא הזמן שבו התקרר, ולא הזמן שבו הגיעה הצפה נפרדת. כל אחד מאלה הוא מדידה על מפות ציבוריות, וכל אחד מהם נעשה במאמר הזה.

המאמר מגדיר תחילה את המונחים שלו (חלק A) ומזכיר את מה שהסדרה קבעה (חלק B), כך שלמילים פתח, ים, אגן וכיפת הזנה תהיה משמעות אחת לאורך כולו. לאחר מכן הוא עונה על שאלתו המרכזית, מהו ים וכמה ימות יש לפי כל הגדרה, וקורא את הים כמקור החומר החוזר (חלק C). הוא עוקב אחר הפתחים, הגלויים והקבורים (חלק D), אחר כיפת ההזנה שמתחת לכל ים (חלק E) ואחר הקרקעית שקפאה מעליה (חלק F). חלק G מציב את הימות ואת המכתשים זה לצד זה בזמן, לפי גודלם ולפי מצבם כשקפאו. חלק H מתאר את המנוע שהניע את ההזנה — לחץ, ציפה, צמיגות, חומרים נדיפים והחום של כדור הארץ — וחלק I את הגאומטריה של החשיפה: הסדר שבו הפתחים יצאו מתחת למגע. לאחר מכן המאמר קורא את הכימיה (חלק J) ואת השעונים (חלק K). התוצאות שנמדדו מרוכזות בחלק L, התחזיות והמבחנים שלהן בחלק M; חלקים N ו-O דנים ומסכמים.

מה המאמר מציג

ים הוא פתח מעל כיפת הזנה. חומר שנדחף מעלה ממוקד תת-קרקעי הרים מרכז והרחיב את שוליו, וכך בנה כיפה מתחת לפתח; דרכה עלה החומר אל הים; ברוב הפתחים הוא הושלך החוצה, וחלק ממנו חזר אל פני השטח כחומר חוזר (Serenitatis-I Imbrium), הימות של המגע, לא השליכו; Serenitatis רק פצפוצים קלים). מה שהספרות סופרת כים — מישור כהה של בזלת — הוא מה שנשאר על פני השטח של פתח כזה. כשסופרים אותם כפתחים, הימות אינם במקום שבו נמצאת הבזלת: 44 מתוך 73 כיפות ההזנה הנראות בכבידה נמצאות מתחת לרמה בהירה, 36 מהן בצד הרחוק, קבורות תחת השכבות שלו יחד עם המכתשים שהן יצרו (חלק D).

הקרקעית קפאה כמו אגם, ושקעה מעל הכיפה שלה. כל קרקעית שומרת על מפלס אחד, כ-3 ק"מ מתחת לשפה שלה; הימות של המגע נמצאים במפלס המישורים שלהם, הימות הרחוקים עמוק בתוך צווארון של החומר החוזר שלהם עצמם; מרכזו של ים נמוך משוליו, ויותר ככל שהכיפה חזקה יותר; הגורמים האפשריים הם משקלו של הגוף הצפוף והעשיר בברזל שמתחתיו, יניקה, ובעיקר התפשטות והתכווצות בחום ובקור, החזקה יותר ככל שהמסה גדולה יותר — לבדיקה (חלקים E, F).

הימות הם המקור של החומר החוזר. הקרקע סביב כל ים נושאת את הברזל והטיטניום שלו, שיוורדים עם המרחק, והמכתשים הגדולים בקרבתו עניים יותר מאותה קרקע, משום שהשליכו הצידה את הציפוי שהים הניח (חלק C). התורים מרוכזים במקום שבו הירח נגע אחרון בכדור הארץ: דיסקת המגע, 17.5% מפני השטח, מחזיקה 95% מהתורים שמעל 3 ppm (חלק J).

הימות נאטמו לפי סדר. רוב הפתחים הישנים של הצד הרחוק נאטמו מוקדם, כשהאגס גדל ופחות מחום כדור הארץ הגיע אליהם (Moscoviense, שהוזן מ-Serenitatis, הוא היוצא מן הכלל); פתחי השוליים השליכו לאורך זמן רב. הימות של הצד הקרוב היו מעברים פתוחים שדרכם עבר הלחץ של כדור הארץ אל הירח; בשחרור הלחץ הפסיק להגיע אל הירח, והפליטות פסקו. הימות של הצד הקרוב היו אז חמים ובעלי צמיגות נמוכה, וקפאו לאט, מבחוץ פנימה, ולכן הקרקעיות שלהם חלקות — Mare Imbrium מחזיק 11 מכתשים של 20 ק"מ ומעלה למיליון קמ"ר לעומת 205 ברמות. אחרי השחרור את המכתשים הקטנים יצרו טיפות שכדור הארץ זרק, המפזר האחרון (חלק §F.5–F.6, I).

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

איך לקרוא את התיבה. הפסקה הראשונה היא ההגדרה שעליה נשען המאמר כולו, ויש לה שלושה חלקים. כיפת ההזנה היא הגוף שמתחת: חומר שנדחף מעלה ממוקד מתחת לפני השטח הרים את הקרקע שמעליו באמצע ופרש אותה בצדדים, ככיפה. הפתח הוא המקום שבו הזרימה הזו פרצה דרך המעטפת: חומר עלה דרכו, וברוב הפתחים הושלך החוצה, וחלק ממנו ירד חזרה כחומר החוזר שיצר את המכתשים (מאמר 6); Imbrium-I-Serenitatis, הימות של המגע, לא השליכו (Serenitatis רק פצפוצים קלים). הבזלת היא מה שנשאר: ההתך

האחרון בפתח, שקפא למישור הכהה שאנו רואים. כשקוראים כך, ים מזוהה לפי הכיפה שמתחתיו, ומתברר שרוב הכיפות אינן נושאות בזלת כלל.

הפסקה השנייה אומרת מה הקרקעית רושמת. אגם קופא למשטח שטוח אחד; קרקעית שנמצאת במפלס אחד בכל מקום קפאה באותו אופן. כשהזרימה פסקה, הכיפה שמתחת קפאה לגוף צפוף ועשיר בברזל, ומרכז הקרקעית נמוך מעליה — ככל שהכיפה חזקה יותר, כך השקיעה עמוקה יותר. שלושה גורמים יכולים להנמיך אותו: משקלו של הגוף הזה, יניקה, ובעיקר התפשטות והתכווצות בחום ובקור, החזקה יותר ככל שהמסה גדולה יותר בקוטר ובעומק; המדידות עדיין אינן בוחרות ביניהם. הפסקה השלישית אומרת לאן הלך החומר שהושלך: אל הקרקע סביב כל ים, כציפוי עשיר בברזל ובטיטניום, העבה ביותר ליד השוליים. התוריום מסמן דבר אחר, את המקום שבו הירח נגע אחרון בכדור הארץ.

הפסקה הרביעית נותנת את הסדר שבו הימות פסקו. רוב הפתחים של הצד הרחוק נאטמו ראשונים, כשהאגס גדל ופחות מחום כדור הארץ הגיע אליהם; *Moscoviense*, שהוזן מ-*Serenitatis* דרך מעבר פנימי ישר, הוא היוצא מן הכלל. פתחי השוליים השליכו לאורך זמן רב. הימות של הצד הקרוב היו מעברים פתוחים שדרכם עבר הלחץ של כדור הארץ, דרך האגס, אל הירח כל עוד הגוף היה מחובר; בשחרור הלחץ הפסיק להגיע אל הירח, והפליטות פסקו. הימות של הצד הקרוב היו אז חמים ובעלי צמיגות נמוכה, והם קפאו לאט, מבחוץ פנימה, לאחר שכמעט כל החומר החוזר כבר נחת. זו הסיבה שהקרקעיות שלהם נקיות כל כך: ב-*Imbrium* יש 11 מכתשים גדולים למיליון קמ"ר, במקום שבו ברמות יש 205. אחרי השחרור רק טיפות שכדור הארץ זרק עוד הגיעו אל הירח, והן פיזרו את המכתשים הקטנים (F.6§).

חלק A — מונחים והגדרות

הבעיה

אותה מילה, ים (mare), משמשת שם למשטח, לחור ולהיסטוריה. **הגישה:** המבנה והמשטח שלו מקבלים שמות נפרדים, ומקור החומר החוזר מוחזק בנפרד מהמקום שבו נחת.

חלק זה קובע את המילים לפני שהמאמר משתמש בהן. הסיבה מעשית: בספרות המילה mare (בלטינית "ים", ברבים maria, ובעברית ים וימות) משמשת בבת אחת למשטח כהה, לחור שמתחתיו ולסיפור של מילוי החור, וטיעון שעובר בין השלושה בלי לומר זאת אינו ניתן לבדיקה. כאן כל דבר מקבל שם משלו. חלק A מציג תחילה את המכשירים, המדידות והחומרים שהמאמר נשען עליהם; לאחר מכן A.1§ מגדיר את ארבעת המבנים של המודל — כיפת ההזנה, הפתח, הים והאגן — ומעמיד כל אחד מהם לצד משמעותו בספרות; A.2§ מפריד בין המקום שממנו בא החומר של מכתש לבין המקום שבו נחת, הבחנה שכל ספירת מכתשים במאמר תלויה בה.

מילות המדידה. הימות נקראים דרך מספר קטן של מכשירים ומספר קטן של חומרים. כל אחד מהם מוצג כאן פעם אחת, במילים פשוטות, כדי שהחלקים הבאים יוכלו להשתמש בו בלי לעצור. אפשר לקרוא את הטבלה עכשיו, או לחזור אליה כשהמונח מופיע לראשונה.

מונח	מהו	כיצד המאמר משתמש בו
הקרקע וחומריה		
רמה (highland)	הקרקע הבהירה, בהירת הגוון, המכסה את רוב הירח, ענייה בברזל	ה"קרקע" שאליה משווים את הימות ואת המישורים; הרחק מכל בזלת היא מכילה כ-2.30% FeO במשקל (C.7§)
אלבדו	החלק מאור השמש שמשטח מחזיר; למשטח כהה אלבדו נמוך	הדרך שבה הספרות מזהה ים במבט עין (C.1§)
בזלת	לבה כהה, עשירה בברזל ולעתים קרובות בטיטניום, שקפאה מהתך נוזלי — נוזלי כמו שמן קל, כ-1 פסקל-שנייה (G.3§)	פני השטח האחרונים של פתח (A.1§)
FeO, TiO ₂ , אחוז משקלי	תחמוצת ברזל וטיטניום דו-חמצני, הנתונים באחוזים ממשקל חומר פני השטח; מצלמת הרב-ערוצים של Kaguya (Multiband Imager) קוראת אותם מצבע אור השמש המוחזר, בפיקסלים של כ-240 מ' [S3]	טביעת האצבע של חומר הים על הקרקע שסביב ים (C.7–C.9§§)

תוריום, ppm	יסוד רדיואקטיבי הנשאר בנוזל כשהתך מתקרר, ולכן מצטבר בנוזל האחרון; Lunar Prospector מיפה אותו מקרני הגמא של התפרקותו, בתאים של כ-60 ק"מ [S4]; ppm הוא חלקים למיליון, גרמים לטונה	הסימן של המגע, האזור האחרון שהשתחרר מכדור הארץ (חלק J)
KREEP	חומר עשיר באשלגן (K), ביסודות הנדירים (REE) ובזרחן (P), יחד עם תוריום — כולם יסודות הנשארים בנוזל האחרון	הספרות ממקמת אותו מתחת ל-Procellarum כמקור החום של הבזלת; המודל אינו עושה זאת (מבוא, חלק J)
חומר נפלט (ejecta)	החומר שמכתש הנוצר משליך החוצה ומניח סביבו	מובחן מהחומר החוזר שיצר את המכתש (A.2§)
כבידה		
GRAIL	שתי חלליות שטסו זו אחר זו סביב הירח; כשכל אחת עברה מעל אזור צפוף יותר היא נמשכה מעט קדימה או נבלמה מעט, והשינוי במרחק ביניהן מדד את הכבידה שמתחת	מקור שדה הכבידה, המודל [S2] GRGM1200L
דרגות 6–660	השדה נכתב כסכום של גלים סביב הירח; גל מדרגה n נכנס n פעמים סביבו. השמטת הדרגות שמתחת ל-6 מסירה את השינויים הרחבים ביותר, בקנה מידה של הירח כולו; העצירה ב-660 קובעת את הפרט העדין ביותר שנשמר	קובעות אילו גדלים של גוף צפוף המפה יכולה להראות
אנומליית בוגר (Bouguer)	הכבידה הנמדדת פחות משיכתו של התבליט הנראה (גבעות, דפנות מכתשים), המחושבת עבור קרום בצפיפות 2,550 ק"ג/מ"ק. מה שנשאר בא מהבדלי צפיפות מתחת לפני השטח — כמו ששוקלים חבילה ומפחיתים את משקלה הידוע של הקופסה כדי ללמוד על תוכנה	המפה שבה נמצאות כיפות ההזנה
מיליגל (mGal)	יחידה של אנומליית כבידה: אלפית הגל, וגל הוא 1 ס"מ/ש"י ²	כיפת הזנה חייבת לבלוט ב-50 מיליגל ויותר מעל הטבעת שסביבה (C.3§)
גרדיאנט הכבידה	מידת המהירות שבה כבידת בוגר משתנה ממקום למקום. הוא חזק ביותר בשולי גוף צפוף, ולכן מפת גרדיאנטים משרטטת את קווי המתאר של גופים כאלה, כמו שקווי גובה מצטופפים בשפת מצוק	המפה שעליה המחבר זיהה את 34 הימות (C.2§)

מסקון (mascon)	“ריכוז מסה” (mass concentration): אזור של עודף מסה מתחת לאגן, הנראה כשיא כבידה	במודל, כיפת ההזנה (A.1§)
מפות וקטלוגים		
מפת הימות של LROC	קווי המתאר של הבזלת הכהה, המשורטטים על תמונות המצלמה של Lunar Reconnaissance Orbiter (LROC): 644 מצולעים המקובצים ב-646 יחידות תחת 97 שמות [S1]	ספירת הבזלת (C.3§); כשהיא משמשת מסכה, היא מסירה את פיקסלי הבזלת ממדידה, כך שהקרקע שליד ים נקראת בלי הים
QuickMap	מציג המפות המקוון של נתוני LROC, שבו אפשר להניח כבידה ותמונות זו על גבי זו	המקום שבו המחבר סימן את הפתחים במבט עין (C.2§)
קטלוגי מכתשים	Robbins (2019), כל מכתש של 20 ק”מ ומעלה [S5]; Wang & Wu (2021), כל מכתש של 1 ק”מ ומעלה [S6]	המכתשים הנספרים והנקראים לאורך כל המאמר
מקומות על הירח		
הצד הקרוב והצד הרחוק	הירח מסתובב פעם אחת על צירו בכל הקפה, ולכן מפנה פנים אחד תמיד לעבר כדור הארץ: הצד הקרוב	שני חצאי הכדור המשווים לאורך כל המאמר
החצי המוביל והחצי הנגרר	החצי הפונה לכיוון תנועת הירח במסלולו, שמרכזו ב-90° מערב, והחצי שמאחוריו, שמרכזו ב-90° מזרח	המקום שבו נחת החומר החוזר (B.2§)
הנקודה התת-ארצית	הנקודה על הירח הפונה ישירות אל כדור הארץ	המרחקים בנספח A נמדדים ממנה

A.1 פתח, ים, אגן וכיפת הזנה

ארבעה מבנים נושאים את המודל, ונוח לדמיין אותם מלמטה למעלה: גוף צפוף מתחת (כיפת ההזנה), המקום שבו החומר שלו הגיע אל פני השטח (הפתח), פני השטח שהפתח השאיר אחריו (הים), והשוליים שסביבו (האגן).

כיפת ההזנה. כיפת הזנה נוצרת במקום שבו חומר נדחף כלפי מעלה ממוקד תת-קרקעי. הדחיפה מרימה את המרכז ומרחיבה את השוליים, וכך בונה כיפה מתחת לים. ממנה עולה החומר אל הים; ברוב הפתחים הוא נפלט החוצה, וחלקו חזר אל פני הירח כחומר חוזר (Serenitatis-Imbrium, הימות של המגע, לא השליכו; Serenitatis רק פצפוצים קלים). הכיפה אינה חדירה (intrusion) ואינה פקק: היא נוצרת מהזרימה העוברת דרכה והלאה. להבדל יש משמעות. חדירה היא גוף של התך הנכנס לקרום ונעצר בו; פקק הוא מה שחוסם תעלה. כיפת הזנה אינה גוף שנח במקומו ואינה מכשול; היא הצורה שהזרימה עצמה בונה כשהיא עוברת כלפי מעלה, כמו שמי מעיין חזק מרימים תלולית מעל מוצאם בזמן שהם זורמים דרכו. כשהזרימה פסקה, הכיפה קפאה לגוף צפוף ועשיר בברזל, ואת הגוף הזה רואה שדה הכבידה היום (חלק E).

הפתח. הפתח הוא המקום שבו ההזנה הגיעה אל פני השטח. פתח יציאה השליך חומר החוצה; פה (mouth) העביר חומר בעודו מכוסה, לעבר פתחי היציאה, ונחשף רק כשהמגע נסוג. אותו מבנה יכול להתחיל כפה ולהסתיים כפתח יציאה (I.2§). פתח אינו צינור בעל דפנות: הוא אזור של נזל בתוך חומר האם, התחום על ידי

ניגוד בצמיגות, שדרכו עובר לחץ. צמיגות היא ההתנגדות של חומר לזרימה — לדבש יש יותר ממנה מאשר למים, ולמעטפת קרה וקשיחה יש הרבה יותר משלשניהם. לכן הפתח מוגדר לפי הקלות שבה החומר שלו זורם בהשוואה לחומר שסביבו, ולא לפי דופן; הלחץ מלמטה עובר דרך האזור הנזולי כמו דרך מרווח, והחומר הקשיח שסביבו אינו מניח לו לעבור.

הטבלה מעמידה כל מילה מוכרת לצד המשמעות שהספרות נותנת לה ולצד המשמעות שיש לה במאמר זה. קוראים אותה שורה אחר שורה: העמודה הראשונה היא המילה, האמצעית — מה שקורא שהוכשר בגיאולוגיה ירחית יבין ממנה, והאחרונה — מה שהיא אומרת בעמודים הבאים.

מונח	בספרות	במאמר זה
אגן	מכתש גדול של גוף פוגע חיצוני	השוליים של פתח, הבנויים משכבות של החומר החוזר שלו עצמו (F.3§)
ים	הבזלת הממלאת אגן, או כל מישור בזלת כזה	פתח מעל כיפת הזנה; הבזלת היא פני השטח האחרונים שלו
מסקון	עודף מסה מתחת לאגן: הרמת מעטפת ועומס בזלת	כיפת ההזנה, שקפאה לגוף צפוף ועשיר בברזל (חלק E)
ים נסתר (cryptomare)	בזלת המוסתרת תחת חומר נפלט מאוחר יותר	פתח קבור: כיפת הזנה מתחת לשכבות (חלק D)
קרקעית	פני הבזלת העליונים	פני השטח הקפואים של הפתח, כ-3 ק"מ מתחת לשפתו (חציון 3.4 ק"מ, F.1§)

שתי שורות נושאות את רוב המשקל. בשנייה, הים מפסיק להיות משטח ונעשה מבנה: הבזלת הכהה היא רק הדבר האחרון שהפתח הותיר מלמעלה. ברביעית, ים נסתר — בספרות, ים המוסתר מתחת לחומר בהיר — נעשה פשוט פתח שפני השטח שלו כוסו מאוחר יותר; הוא נספר כמו כל פתח אחר. שאר השורות נובעות מכך: האגן הוא השפה המוגבהת שהפתח בנה מחומרו שלו, המסקון הוא כיפת ההזנה הקפואה, והקרקעית היא הפנים העליונות הקפואות של הפתח.

A.2 המקור אינו מקום הנחיתה

פתח יציאה משליך חומר שנוחת במרחק של 50 עד 1,000 ק"מ, ובזמן שהוא פעיל הקרקעית שלו עצמו נמסה מחדש ומכסה את התיעוד שלה. מכאן נובעות שתי תוצאות, והמשוואה שלהלן מנסחת אותן. משטח הסמוך לפתח פעיל צובר מכתשים שנוצרו ממה שהפתח משליך; הקרקעית של הפתח עצמו מאבדת את המכתשים הנוחתים עליה, משום שהיא עדיין נזלית או נמסה שוב. לכן מספר המכתשים הנראה על משטח הוא

$$N_{\text{obs}} = N_{\text{bg}} + N_{\text{return}} - N_{\text{erased}},$$

כאשר N_{obs} הוא מספר המכתשים הנצפים על המשטח היום, N_{bg} הוא הרקע — המכתשים שנוצרו שם (1) מחומר שבא מכל המקורות האחרים — N_{return} הוא המכתשים שנוצרו מחומר שהושלך מהפתח הסמוך, ו- N_{erased} הוא המכתשים שנמחקו מאוחר יותר בהתכה או בכיסוי. המשוואה היא כלל של הנהלת חשבונות ולא מודל שיש להתאים לנתונים: היא אומרת רק שספירת מכתשים היא תוצאה של שלושה תהליכים בבת אחת, ואי אפשר לקרוא אותה כשעון פשוט.

מסכה המסירה את הימות אינה משיבה את מה שהם מחקו: השמטת קרקעית של ים מספירה מסירה את שטחה מההשוואה, אבל המכתשים שהיא המיסה בזמן שהייתה פעילה אבדו, ושום דבר בקרקע שנותרה אינו מראה היכן היו. אי אפשר לשייך מכתש לים שהשליך את חומרו — החומר החוזר אינו נושא תווית של מקורו,

ופתח משליך לכל מרחק בין 50 ל-1,000 ק"מ. המבחן הוא סטטיסטי, לפי מרחק ולפי צד: אם הימות הם המקורות, הקרקע והמכתשים שסביבם חייבים, בממוצע, לשאת את החומר שלהם בעוצמה רבה יותר בקרבתם מאשר הרחק מהם (C.7§), וחייבים להיות שונים בין החצי המוביל לחצי הנגרר (מאמר 6).

מה שיש בידינו עכשיו: שמות נפרדים לגוף הצפוף שמתחת (כיפת ההזנה), למקום שבו הגיע אל פני השטח (הפתח), לפני השטח שהשאיר אחריו (הבזלת של הים) ולשוליים שסביבו (האגן); וכלל האומר שספירת מכתשים רושמת הגעה, חזרה ומחיקה יחד.

חלק B — מה שהסדרה כבר קבעה

הבנייה

הימות נקראים דרך הבנייה של מאמר 3 ודרך החומר החוזר של מאמר 6, ואף אחד מהם אינו נגזר כאן מחדש. **הגישה:** מה שנלקח מהם מוצג במקום אחד, והמספרים נעולים.

מאמר זה נבנה על שני מאמרים קודמים בסדרה ואינו חוזר על טיעוניהם. ממאמר 3, *מנגנון LEF בפועל*, הוא לוקח את הגיאומטריה של הגוף שנבנה על כדור הארץ, ומתוך הגיאומטריה הזאת — את האזורים שאליהם מחולק הירח של היום. ממאמר 6, *המכתשים*, הוא לוקח את מקור המכתשים: חומר שנפלט וחזר. חלק זה מציין מה נלקח, היכן במאמר הקודם הוא נגזר, ואת המספרים המוחזקים כאן קבועים; קורא המבקש לבדוק אחד מהם מופנה אל מקורו.

B.1 ממאמר 3: הגוף על האגס

במודל, כדור הארץ, שהסתובב במהירות, הרים בליטה שנמשכה לצורת אגס, והגוף שהפך לירח נבנה על קצהו (מאמר 3). הגוף ישב על הקצה המעוקל של האגס של כדור הארץ: כדור פחוס, עם כיפה תחתונה על הקצה וכיפה עליונה מעליה — כדור מעוך המונח על תמיכה מעוגלת, צדו התחתון צמוד לתמיכה וראשו מתנשא גבוה מעליה. הקצה היה ברוחב 6,000 ק"מ כשההתעגלות החלה, וברוחב 3,000 ק"מ בשחרור: ככל שהגוף נעשה עגול יותר, האזור שבו נגע בכדור הארץ הצטמצם למחצית רוחבו (מאמר 3, B.4§).

הבנייה התנהלה בשלושה שלבים: *ההתעגלות החוצה*, כשהגוף שישב על הקצה נעשה כדור; *הפחיסות*, שבה נוצרו רוב המכתשים והגדולים שבהם, כשההתמיינות כבר התקדמה והחומר הנפלט היה קל ועשיר במים; ו*ההתעגלות פנימה*, כשהפחיסות נרפתה והגוף נעשה צפוף יותר. התמיינות היא הפרדות של התך לחלקים כבדים יותר וקלים יותר; עד הפחיסות היא התקדמה מספיק כדי שמה שנפלט החוצה היה קל ועשיר במים. כל אחד משלושת השלבים נגזר במאמר 3; כאן הם קובעים את הסדר שבו נחשפו הפתחים.

שלושה אזורים עוברים אל הירח של היום: הגבעה, בסיס הבליטה, ברוחב 6,000 ק"מ, המכילה 99% מימות הצד הקרוב; המגע, 3,000 הק"מ האחרונים, המכיל 66% מהם; ו-Mare Imbrium בתוך המגע, הפתח שנשאר מחובר לכדור הארץ עד הניתוק; דרכו ודרך Serenitatis, שהתקלף קודם, נכנסו אל הגוף חום וחומר מכדור הארץ. שני החלקים הם חלקים של שטח: של שטח הבזלת הכהה של הצד הקרוב במפת LROC, לא של מספר הימות (לפי מספר, 13 מתוך 14 ימות הצד הקרוב שבנספח A נמצאים בגבעה ו-4 במגע). ה-66% הם של המגע כפי שהותווה על המפה במאמר 3; על המעגלים של נספח A, ברדיוס 3,000 ק"מ ו-1,500 ק"מ, החלקים יוצאים 99.8% ו-72%. הגבעה היא האזור שישב מעל הקצה הרחב כשההתעגלות החלה, והמגע — האזור שעדיין היה מחובר בשחרור; על הירח של היום הם שתי דסקיות מקוננות זו בתוך זו בצד הקרוב, ומרכזיהן נתונים ב-B.3§. המקור של כל אחד מהם הוא מאמר 3, B.4§.

איך המגע הרפה. *קו הקורוטציה* הוא המרחק שבו גוף המסתובב עם כדור הארץ כבר נע במהירות של מסלול חופשי. המגע התקלף מקצה האגס כשמרכז המסה של הגוף הגיע אל הקו הזה, והירח נותק מעט מעבר לו. ניתוק בדיוק על הקו היה משאיר את הירח במסלול מעגלי, שהגאות אינה יכולה להפוך לאלילפטי; המסלול האליפטי של הירח מחייב אפוא ניתוק מעט אחרי שמרכז המסה חצה את הקו. הסדרה מאמצת שחרור כ-210 ק"מ מעבר לקו, כשמעט יותר ממחצית הירח, כ-58%, כבר חצתה אותו, משום ששני מבחנים בלתי תלויים מצביעים שניהם עליו:

הנטייה של היום (שחרור ב-22.5°) והאקסצנטריות של היום (עבור ירח צעיר וחם). הטבלאות המלאות נמצאות במאמר 3.

הפתחים הם משלושה סוגים לפי מועד חשיפתם: פתחי המעטפת השטוחה בשלב הראשון; הפתחים שעל הכיפה העליונה, שנחשפו כשעלתה והשליכו חומר החוצה; והפתחים שמתחת לכיפה התחתונה, שנשארו מכוסים עד השחרור ושדרכם חומר רק עבר. אלה הם פתחי היציאה והפיות של A.1§, ממוקמים עכשיו בזמן; האזורים שלהם על הירח של היום נתונים עבור כל ים בנספח A.

הצד הקרוב נפתח בחום: האזור שנגע בקצה האגס של כדור הארץ, 3,000 הק"מ של המגע, המיס והסיר את הסיאל שלו — השכבה העליונה והקלה של הקרום, העשירה בצורן ובאלומיניום — והקרום הדק שמתחת לימות הצד הקרוב דק משום שהם פתחים (מאמר 3, B.7§). סדר הסיבה הוא העיקר: הקרום שם אינו דק קודם ונפרץ אחר כך; הוא דק משום שהפתחים והחום שמתחתם הסירו את שכבתו העליונה.

B.2 ממאמר 6: החומר החוזר

חומר שנפלט מהפתחים חזר אל המעטפת במהירות שבה יצא, ויצר את המכתשים: כ-99% מהם הם של חומר ארצי שחזר (מאמר 6, המכתשים). אבן שנזרקת כלפי מעלה נופלת חזרה במהירות שבה נזרקה; באותו אופן החומר שהושלך מהפתחים נחת חזרה על המעטפת מהר די הצורך כדי ליצור מכתשים. החומר הנפלט של הגוף עצמו נחת לעבר החצי הנגרר שלו, 90° מזרח, ופגש חזיתית את החצי המוביל שלו, 90° מערב — החצי המוביל נע אל תוך החומר כמו רץ הנע אל תוך גשם, ונפגע בעוצמה רבה יותר. הימות הם מקור החומר הזה, והמסה הזרה שגוף פוגע חיצוני היה משאיר אינה נמצאת בקרום (מאמר 6, §L.5§, C.1, חלקים I–F). זה הקשר בין שני המאמרים: מאמר 6 מודד את המכתשים, ומאמר זה מציין בשמם את הפתחים שהשליכו את החומר שיצר אותם.

B.3 המספרים הנעולים

הטבלה מפרטת את המספרים הלקוחים משני המאמרים. הם מוחזקים קבועים לאורך כל המאמר: שום תוצאה של מאמר זה אינה מתקבלת על ידי כוונתם. העמודה האחרונה נותנת, עבור כל אחד מהם, את המאמר שממנו הוא בא ואת מה שהוא מודד שם.

גודל	ערך	מקור
קצה האגס, תחילת ההתעגלות / השחרור	ק"מ 3,000 / 6,000	מאמר 3: רוחב המגע מצטמצם מ-6,000 ל-3,000 ק"מ כשהגוף מתעגל החוצה (B.4§)
בסיס האגס	ק"מ 9,000–11,000	מאמר 3: רוחב האגס במקום שבו עלה מכדור הארץ
מרכז הגבעה / מרכז המגע	צפון 13.1° מזרח / 24.1° צפון 335.2° מזרח 16.6°	מאמר 3, B.4§: שתי הדסקיות ממופות על הצד הקרוב של היום; 335.2° מזרח הוא 24.8° מערב
הכיפה בצד הקרוב (cap) / החגורה	31° / 31°–70°	מאמר 3, B.4§: כלל החלק היחסי — חלק שומר על חלקו בפני השטח כשהגוף מתעגל, וחלקים של 7% ו-33% הופכים לכיפות של 31° ו-70°

צפיפות הגוף על הקצה	ק"ג/מ"ק 1,300	מאמר 3, B.2§: המצב המוקצף והקל של מסת הירח המלאה היושבת על הקצה, לעומת 3,344 היום
חלקם של המכתשים הארציים החוזרים	כ-99%	מאמר 6: המכתשים שנוצרו מחומר חוזר, ולא מגופים חיצוניים

שלוש השורות הראשונות קובעות היכן הדברים נמצאים; הרביעית קובעת את אזורי החשיפה (כיפה בצד הקרוב, בטווח 31° מהנקודה התת-ארצית, וחגורה מ- 31° עד 70° ; הכלל קובע את גודלם סביב הנקודה התת-ארצית, ואילו על הירח של היום הם שוכנים סביב מרכז המגע, ולפיו נספח A ממקם כל ים — מאמר 3, B.4§); החמישית קובעת עד כמה היה הגוף קל בזמן שנבנה; השישית קובעת מאין באו המכתשים. כשהמספרים האלה קבועים, שאר המאמר פונה אל הימות עצמם.

חלק C — הימות: מהו ים, כמה ימות יש, והים כמקור

הבעיה

מספר הימות תלוי במה שהוא ים, וים שהוא פתח חייב להיות זה שהשליך את מה שיצר את המכתשים שסביבו. **הגישה:** שתי ההגדרות מועמדות זו לצד זו, כל ספירה ניתנת תחת ההגדרה שלה ומותאמת אחד לאחד, והקרקע שסביב הימות נקראת לחיפוש החומר שלהם.

זהו החלק המרכזי של המאמר, והוא עונה על שלוש שאלות בזו אחר זו. מהו ים — מישור כהה, או פתח מעל כיפת הזנה (C.1–C.2§§)? כמה ימות יש תחת כל הגדרה, ומדוע הספירות שונות (C.3–C.6§§, מחקר 1)? ואם ים הוא פתח — האם הוא השליך את החומר שסביבו (C.7–C.10§§, מחקר 2)? על שתי השאלות הראשונות עונים שדה הכבידה ומפת הבזלת; על השלישית — הכימיה של הקרקע.

C.1 הים בספרות

בספרות ים הוא משטח: מישור כהה של בזלת, המזוהה לפי האלבדו הנמוך שלו וממופה לפי קו המתאר שלו. האגן הוא דבר נפרד, המבנה שיצר גוף פוגע חיצוני, והים הוא המילוי שלו. לכן אגן בלי בזלת אינו ים, וכתם בזלת על קרקעית של מכתש הוא ים. בזלת המוסתרת תחת חומר בהיר מאוחר יותר היא ים נסתר (cryptomare), ים שאי אפשר לראותו. האיגוד האסטרונומי הבינלאומי מכנה את המישורים הכהים לפי סוגם: Mare, Oceanus, Palus, Sinus, Lacus — אוקיינוס, ים, אגם, מפרץ וביצה, שמות שניתנו כשסברו שהמישורים הכהים הם מים. לפי הגדרה זו ים נספר במבט: כל מה שכהה, שטוח ועשוי בזלת הוא ים, יהיו גודלו ומה שמתחתיו אשר יהיו.

C.2 הים במודל

במודל ים הוא פתח מעל כיפת הזנה, והבזלת היא רק מה שנותר על פני השטח שלו. לפי הגדרה זו ים נספר לפי מה שמתחתיו, ולא לפי מה שמעליו. מכאן נובעים שני כללים. כל פתח שיש מתחתיו כיפת הזנה נספר, גם כשהוא קבור ואינו נושא בזלת. כתם בזלת שמכתש מאוחר חשף בקרקעיתו, בלי כיפה מתחתיו, אינו נספר: זהו מכתש שנחת על אזור לבה וחשף קרקעית של לבה. הכלל הראשון מוסיף ימות שהספרות אינה רואה; השני מסיר כמה מאלה שהיא רואה.

הימות שנסקרו במאמר זה. הימות זווה על ידי המחבר על גרדיאנטי שדה הכבידה של בוגר מ-GRAIL, המראים את שולי הגופים הצפופים שמתחת לפני השטח: 34 פתחים, המפורטים בנספח A עם מיקומיהם, האזורים שלהם וכיפת ההזנה שמתחת לכל אחד. הזיהוי נעשה במבט עין: המחבר סימן, על מפת הגרדיאנטים ב-QuickMap, את קווי המתאר העגולים התוחמים גוף צפוף, בין שמונחת עליהם בזלת ובין שלא. אלה הימות של מאמר זה, וכל מחקר בו נעשה עליהם.

34 ימות ו-36 פתחים מסומנים. שתי ספירות חוזרות במאמר זה, ויש להחזיק אותן בנפרד. המחבר סימן תחילה 36 פתחים במבט עין ב-QuickMap, ממוספרים 1 עד 36; 36 הסימונים האלה הם המדגם של מבחן הקרום (D.2§) ושל מחקר 3. שישה מהסימונים (מספר 2, 8, 14, 15, 22 ו-31) לא עמדו כימות, וארבעה פתחים נוספו מאוחר יותר (מספר 37–40); לכן הקטלוג של נספח A מכיל 34 ימות, וביניהם Copernicus H (35) Sinus Aestuum (36). כשהטקסט מדבר על הימות, הכוונה ל-34 האלה; כשהוא מדבר על הפתחים המסומנים, הכוונה ל-36 הסימונים המקוריים.

לכל ים ניתן שטח הליבה של כיפת ההזנה שמתחתיו. שלושה מהם — Baily ו-Apollo, Ingenii — נמצאים מעל South Pole–Aitken, האגן הגדול והעתיק ביותר בצד הרחוק; כיפות ההזנה שמתחתם "בושלו" ונעלמו בחום שמתחת לאגן הזה, ולכל אחד מהם ניתן רדיוס של 150 ק"מ. מישורי הבזלת הכהים שאינם נושאים כיפת הזנה — Oceanus Procellarum, Mare Insularum, Mare Nubium, Mare Cognitum, Mare Frigoris, Mare — הם הקרום הרגיל של חתך האגס, שנמס במקומו בחום Vaporum, Mare Tranquillitatis ואחרים — אינם ימות: הם הקרום הרגיל של חתך האגס, שנמס במקומו בחום הכללי של כדור הארץ בזמן שהגוף היה מחובר, בלי תעלה אל העומק. הם כהים מאותה סיבה שקרקעית של ים כהה — התך קפא עליהם — אבל ההתך בא מחום שהופעל מבחוץ, ולא מהזנה העולה מלמטה, ולכן אין מתחתם גוף צפוף. במאמר זה הם נקראים *מישורים*. Lacus Mortis ו-Mare Australe, Mare Fecunditatis, אף שהם נמצאים מעל שיאי כבידה, אינם נמנים עם הימות של מאמר זה.

3.c הספירות, לפי כל הגדרה

הטבלה נותנת כל ספירה של הימות שבשימוש, כל אחת תחת ההגדרה שמפיקה אותה. השורות האפורות סופרות משטחי בזלת, כפי שעושה הספרות; השורות הכחולות סופרות פתחים מעל כיפות הזנה, כפי שעושה המודל. הכחול הכהה יותר מסמן את הספירה שעליה נשען הטיעון: כיפות ההזנה, רובן קבורות.

הגדרה	מספר	מה נספר
הספרות: משטחי בזלת		
יחידות בזלת ממופות, LROC [S1]	646	מצולעים של בזלת כהה, תחת 97 שמות
יחידות של 1,000 קמ"ר ומעלה	189	122 בצד הקרוב, 67 בצד הרחוק
שמות לפי סוג	26 / 18 / 1	Mare או Palus / Lacus / Oceanus; השאר הם קרקעיות מכתשים הקרויות על שם המכתשים שלהן
ימות בעלי שם, בלי ששת הגדולים	33	קבוצת המבחן של חלק E
אגנים של 500 ק"מ ומעלה, Neumann ועמיתיו [S10]	20	האגנים הגדולים של שדה הכבידה
המודל: פתחים מעל כיפות הזנה		
ימות שזוהו על ידי המחקר על גרדיאנטי GRAIL	34	14 בצד הקרוב, 20 בצד הרחוק (נספח A)
כיפות הזנה בכבידה, 100 ק"מ ומעלה, 50 מיליגל ומעלה	73	25 מתחת לים פתוח, 4 חלקיות, 44 קבורות
כיפות הזנה ברורות במבחן הקרקעית (E.1S)	22	37 עם החלשות יותר

הספירות של הספרות נעות בין 646 ל-20, לפי מה שנחשב לים אחד: כל מצולע, כל מצולע גדול, כל שם, או כל אגן גדול. הספירות של המודל הן מסוג אחר. 34 הימות הם הפתחים שהמחקר זיהה; 73 כיפות ההזנה הן כל גוף צפוף בשדה הכבידה שהוא גדול וחזק די הצורך כדי להיות כיפה כזאת; ומתוך 73 אלה רק 25 נושאות ים פתוח מעליהן. ספירת הבזלת, כשהיא נקראת לבדה, הייתה מחמיצה לחלוטין את 44 הכיפות הקבורות.

כיצד נמצאו כיפות ההזנה. כיפת הזנה צפופה ומושכת חזק יותר מהקרקע שסביבה. כל כתם עגול של כבידה חזקה יותר, בקוטר 100 ק"מ ומעלה, עם עודף מרכזי של 50 מיליגל ומעלה מעל הטבעת שסביבו, נלקח משדה GRAIL. החיפוש היה אוטומטי: אף כיפה לא נבחרה במבט עין, ואותם שני ספים הוחלו בכל מקום. עבור כל

כיפה נקראו פני השטח שמעליה על מפת LROC: מתחת לים — 25% ומעלה משטחה בזלת; קבורה — פחות מ-5%, רמה בהירה בלבד; חלקית — בין לבין. לכן שני הקטלוגים — 34 הימות שסומנו במבט עין ו-73 הכיפות שנמצאו לפי סף — נבנו באופן בלתי תלוי זה בזה, ו-C.5§ משווה ביניהם.

C.4 מה מפריד בין הספירות

הספירות אינן נבדלות במקרה; לכל הבדל יש סיבה. הטבלה מציינת ארבע, וכל אחת מהן היא מקום שבו שתי ההגדרות נותנות תשובות שונות עבור אותה קרקע.

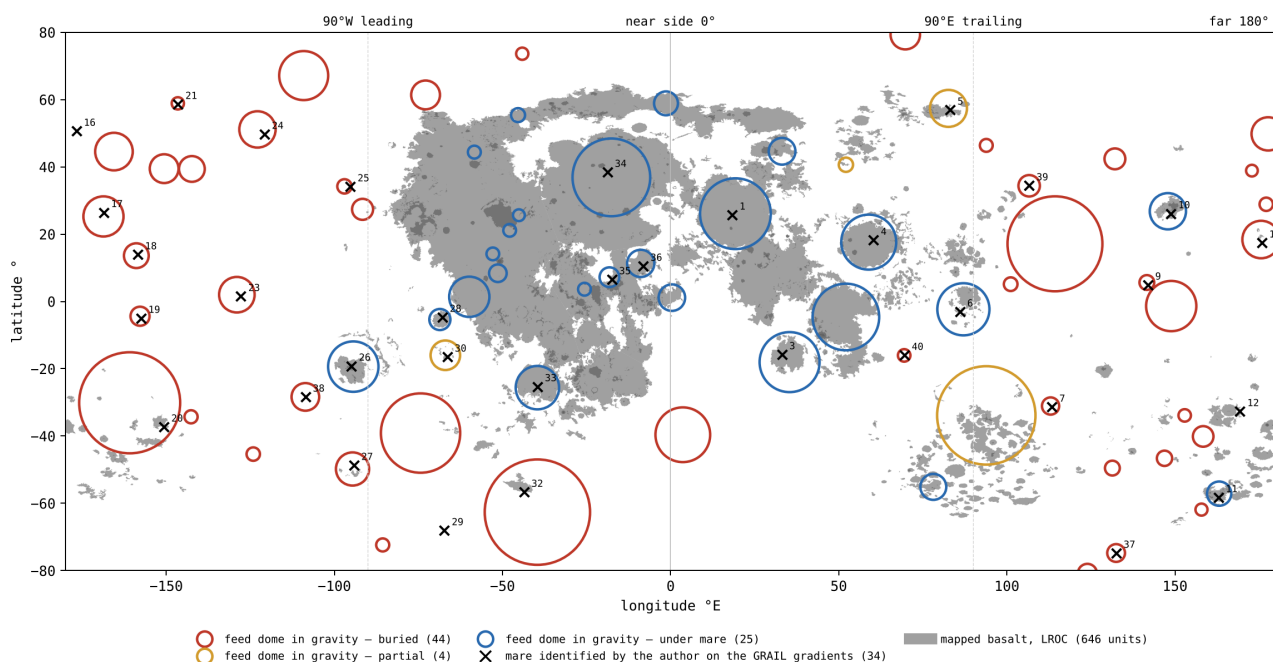
הבדל	סיבה
מישור כהה אחד, כמה פתחים	Oceanus Procellarum הוא מישור אחד של 1.8 מיליון קמ"ר ומכיל כמה כיפות הזנה; הספרות סופרת ים אחד
פתח אחד, כמה יחידות	הבזלת של פתח נחתכת על ידי רמות ומכתשים מאוחרים למצולעים רבים; 646 יחידות הופכות לכמה עשרות פתחים
פתחים בלי בזלת	44 כיפות הזנה אינן נושאות בזלת: 36 בצד הרחוק, 8 בשוליים ובקטבים של הצד הקרוב; הספרות אינה סופרת אף אחת מהן
בזלת בלי פתח	קרקעיות של מכתשים שנחתו על אזור לבה נושאות בזלת ואין מתחתן כיפה; הספרות סופרת אותן, המודל אינו סופר

שתי השורות הראשונות משנות את הספירה בקיבוץ: מישור גדול אחד עשוי להסתיר כמה פתחים, ופתח אחד עשוי להופיע במפה כחלקים רבים. שתי השורות האחרונות משנות אותה בסוג: פתח שאיבד את כיסוי הבזלת שלו עדיין פתח, וקרקעית מכתש שבמקרה נושאת בזלת עדיין מכתש. השורה המודגשת היא ההבדל היחיד הגדול ביותר והחשוב ביותר: 44 פתחים שספירת הבזלת אינה יכולה לראות כלל.

בצד הרחוק הספרות סופרת מעט ימות והמודל — פתחים רבים; בצד הקרוב שתי הספירות קרובות. לכן הדיכוטומיה של הירח אינה דיכוטומיה של פתחים אלא של מה שמכסה אותם. הדיכוטומיה היא הניגוד הידוע בין שני חצאי הכדור: צד קרוב כהה, עשיר בימות, וצד רחוק בהיר, כמעט בלעדיהם.

C.5 התאמת הימות לכיפות ההזנה

אם ים הוא פתח מעל כיפת הזנה, הימות שסומנו על הגרדיאנטים והכיפות שנמצאו לפי סף צריכים להיות אותם מקומות. סעיף זה בודק זאת. 34 הימות שזוהו על גרדיאנטי הכבידה הותאמו ל-73 כיפות ההזנה של שדה הכבידה; ים וכיפה נחשבים לאחד כשהים נמצא בתוך רדיוס הליבה של הכיפה או במרחק של עד 150 ק"מ ממרכזה, הגדול מבין השניים. **33 מתוך 34 הימות יושבים על כיפת הזנה**: כל 14 ימות הצד הקרוב ו-19 מתוך 20 של הצד הרחוק. היחיד שאינו יושב על כיפה הוא Ingenii, מעל South Pole–Aitken, שכיפת ההזנה שלו "בושלה" ונעלמה בחום שמתחת לאגן הזה; Bailliy ו-Apollo, מעל אותו אגן, נמצאים בתוך הליבה של כיפה שכנה גדולה. 33 מתוך 73 הכיפות נושאות ים: 12 מתחת לבזלת, 2 מכוסות חלקית ו-19 מתחת לרמה בהירה. הטבלה המלאה נמצאת בנספח A.



איור 1. שלוש הגדרות של ים על מפה אחת: הבזלת שמופתה על ידי LROC (אפור, 646 יחידות), כיפות ההזנה של שדה GRAIL (עיגולים, לפי הכיסוי שמעליהן: 44 קבורות באדום, 4 חלקיות בענבר, 25 מתחת לים בכחול), ו-34 הימות שזוהו על גרדיאנטי GRAIL (צלבים, ממוספרים כמו בנספח A). היטל שווה-מלבנים (equiangular); גודל העיגול תואם את קוטר הכיפה.

איור 1 מציב את שלוש ההגדרות על מפה אחת, הירח כולו פרוש שטוח, קו האורך לרוחב המפה וקו הרוחב כלפי מעלה. הביטוי תחילה בכתמים האפורים: הבזלת מצטופפת בצד הקרוב, באמצע המפה. אחר כך הביטוי בעיגולים: האדומים, הכיפות הקבורות, נמצאים ברובם במקומות שאין בהם אפור כלל, בצד הרחוק. לבסוף הביטוי בצלבים: כמעט כל צלב יושב בתוך עיגול, אדום או כחול כאחד. המפה מראה במבט אחד את טענת החלק הזה — הפתחים פרושים על שני הצדדים, ואילו הבזלת אינה.

התאמה של 33 מתוך 34 עדיין עשויה לנבוע ממקרה אם הכיפות מכסות את רוב הירח. הטבלה שלהלן שואלת באיזו תדירות גם נקודות שאינן ימות היו נופלות על כיפה. כל שורה מציבה 34 נקודות בדרך אחרת, 20,000 פעמים, וסופרת כמה מהן נוחתות על כיפה. השורה הירוקה היא התוצאה; השורות האדומות הן המקרה; השורה הכתומה היא הצורה המחמירה ביותר של המקרה.

היכן מוצבות 34 הנקודות	על כיפה (ממוצע)	המרב ב-20,000 ניסויים	ניסויים שהגיעו ל-33
34 הימות עצמם	33	—	—
באקראי על פני הכדור	7.9	18	0
הקבוצה כולה מסובבת באקראי לכל כיוון	7.9	26	0
הקבוצה כולה מסובבת בקו האורך בלבד	8.0	33	מתוך 2 100

נקודות המוצבות באקראי נופלות על כיפה בערך 8 פעמים מתוך 34: הכיפות מכסות כרבע מפני השטח. סיבוב קבוצת הימות כולה כיחידה אחת שומר על התבנית שלה — המרווחים וההתקבצויות — ומזיז רק את המקום שבו התבנית נמצאת; גם הוא נותן כ-8. סיבוב בקו האורך בלבד משאיר כל ים בקו הרוחב שלו, כך שכל נטייה של ימות ושל כיפות להעדיף את אותם קווי רוחב נשמרת; גם אז 33 מושג רק ב-2 ניסויים מתוך 100, ורק בסיבובים

של מעלות ספורות, המשאירים את הקבוצה כמעט במקומה. לכן הימות והכיפות אינם שני פיזורים בלתי תלויים שבמקרה חופפים: הם תיעוד אחד.

STUDY 1 המחקר • מחקר 1

שלב 1 • הגדרת שאלת המחקר והבעיה

התופעה. הספרות סופרת את הימות לפי הבזלת הכהה שלהם; המודל סופר אותם כפתחים מעל כיפות הזנה, בין שבזלת מכסה אותם ובין שלא. **הפער בידע.** לא נבדק אם הימות שזוהו על גרדיאנטי הכבידה והגופים הצפופים שנמדדו בשדה הכבידה הם תיעוד אחד או שניים. **שאלת המחקר:** האם הימות שזוהו על גרדיאנטי GRAIL נופלים על כיפות ההזנה של שדה הכבידה לעתים קרובות יותר משהמקרה היה מציב אותם?

שלב 2 • סקירת ספרות (רקע מדעי)

הימות ממופים כיחידות של בזלת כהה, 646 מצולעים במפת LROC [S1]; האגנים הגדולים מזהים כטבעות בטופוגרפיה ובכבידה, 20 של ק"מ ומעלה [S10]; בזלת קבורה, "ימות נסתרים" (cryptomaria), ידועה ממכתשי הילה כהה — מכתשים קטנים שחפרו דרך כיסוי בהיר והשליכו החוצה את הבזלת הכהה שמתחתיו, וכך הקיפו את עצמם בהילה כהה — ומהכבידה [S17]. הגופים הצפופים שמתחת לאגנים הגדולים, המסקונים, מפורשים כמילוי בזלת וכמעטפת מורמת [S20]. **מה חדש כאן:** כל שיא כבידה עגול של 100 ק"מ ומעלה נלקח כמועמד לכיפת הזנה, הכיסוי שמעל כל אחד נקרא, והימות שזוהו על הגרדיאנטים נבחנו מולם.

שלב 3 • ניסוח השערת המחקר

ים הוא פתח מעל כיפת הזנה, ולכן הימות הנראים על גרדיאנטי הכבידה וכיפות ההזנה הנמדדות בשדה הכבידה הם תיעוד אחד: כמעט כל ים יושב על כיפה, הרבה יותר משהמקרה היה נותן; וכיפות רבות אינן נושאות בזלת, רובן בצד הרחוק.

שלב 4 • מערך המחקר (מתודולוגיה)

סוג המחקר: כמותי; התאמת קטלוגים, עם מבחן מקריות בסימולציה. **המדגם:** 34 הימות של נספח A, 73 כיפות ההזנה של שדה GRAIL (דרגות 6–660), 646 יחידות LROC. **הכלים:** כבידת בוגר של GRAIL [S2], מפת הימות של LROC [S1], וקוד המתאים בין הקטלוגים ומגדיל קבוצות אקראיות.

כלל	מדוע, במילים פשוטות
כיפה: שיא כבידה עגול של 100 ק"מ ומעלה, 50 מיליגל ומעלה מעל סביבתו	גוף צפוף מושך חזק יותר מהקרקע שסביבו; הספים משאירים בחוץ כתמים קטנים וחלשים
כיסוי: בזלת על 25% ומעלה, מתחת ל-5%, או בין לבין	כדי להבחין בין ים פתוח לים קבור לפי מה שמונח מעליו
התאמה: בתוך רדיוס הליבה של הכיפה או עד 150 ק"מ ממרכזה, הגדול מבין השניים	ים וכיפה הם אחד אם הים יושב על הכיפה

שלב 5 • איסוף הנתונים (ביצוע המחקר)

הכיפות נמצאו באופן אוטומטי משדה הכבידה; הימות זוהו בתצפית על גרדיאנטי הכבידה. השניים הותאמו לפי הכלל שלמעלה, ואותו כלל הוחל על כל קבוצה אקראית.

שלב 6 • ניתוח הנתונים ועיבודם

ההתאמה. 33 מתוך 34 הימות יושבים על כיפה. האם המקרה יכול לעשות זאת? 34 הימות הוחלפו ב-34 נקודות שהוצבו באקראי על פני הכדור, 20,000 פעמים: בממוצע 8 מהן נופלות על כיפה, לעולם לא יותר מ-18, ואף ניסוי לא הגיע ל-33. לאחר מכן הקבוצה כולה נשמרה בצורתה וסובבה באקראי לכל כיוון: שוב בממוצע 8, לעולם

לא יותר מ-26. בניסוי המחמיר ביותר הקבוצה סובבה בקו האורך בלבד, כך שכל ים שומר על קו הרוחב שלו: 33 ומעלה הושג ב-2 מכל 100 ניסויים, בסיבובים של מעלות ספורות המשאירים את הקבוצה כמעט במקומה. הכיסוי. מתוך 33 הכיפות הנושאות ים, 12 נמצאות מתחת לבזלת, 2 מכוסות חלקית ו-19 מתחת לרמה בהירה.

שלב 7 · הסקת מסקנות וכתובת הדוח

תוצאה. ההשערה נתמכת: הימות הנראים על גרדיאנטי הכבידה וכיפות ההזנה הם תיעוד אחד, וההתאמה רחוקה הרבה מעבר למקרה; ורוב כיפות ההזנה אינן נושאות בזלת, רובן בצד הרחוק. הדיכטומיה של הירח היא דיכטומיה של כיסוי, לא של פתחים. **מגבלות.** הימות זוהו על ידי צופה אחד; ספי הכיפה (100 ק"מ, 50 מיליגל) הם בחירות, וכיפות חלשות יותר היו מעלות את הספירה; כיפה שנמצאה בכבידה בלבד עשויה להיות גוף צפוף ממקור אחר; לשלושת הימות שמעל South Pole–Aitken אין כיפה משלהם. **כיווני מחקר נוספים.** זיהוי שני ובלתי תלוי של הימות על הגרדיאנטים; חזרה על הספירה בספים אחרים ועל השדה של דרגות 6–900.

C.6 מה ההבדל בהגדרה מסביר

שתי ההגדרות אינן נותנות רק מספרים שונים; הן נותנות תמונה שונה של הירח. כשקוראים אותו כבזלת, לירח שני פנים: צד קרוב כהה וצד רחוק בהיר. כשקוראים אותו כפתחים — לא: בצד הרחוק יש יותר כיפות הזנה מבצד הקרוב, 40 לעומת 33, קבורות תחת השכבות שבנו אותו (מאמר 3, B.7§), ואילו בצד הקרוב, שפנה אל כדור הארץ החם, הפתחים היו מעברים פעילים של הלחץ של כדור הארץ — Serenitatis עד שהתקלף, Imbrium עד הניתוק. הצד הקרוב החלק והצד הרחוק השכבתי הם מערכת הזנה אחת תחת שני כיסויים — כמו שני חצאים של שדה עם אותן בארות, שחציו האחד כוסה מאוחר יותר באדמה וחציו האחר נותר חשוף. ומכתש בעל קרקעית לבה אינו פתח: הוא נחת על לבה, והמודל מונה אותו עם המכתשים, לא עם הימות.

מה שיש בידינו עכשיו: הגדרה של ים לפי מה שמתחתיו; ספירה של הפתחים הכוללת את 44 אלה שהבזלת אינה מראה; ומבחן המראה שהימות וכיפות ההזנה הם תיעוד אחד. שאר החלק שואל אם הפתחים האלה השליכו את החומר שמונח סביבם.

C.7 מבחן המקור

אם ים הוא המקור של החומר החוזר, הקרקע שסביבו חייבת לשאת את החומר שלו, ויותר ממנו בקרבת הים מאשר הרחק ממנו. קל לזהות חומר של ים לפי הברזל והטיטניום שבו: הבזלת עשירה בשניהם, והרמה ענייה. לכן המבחן קורא את הברזל סביב הימות, טבעת אחר טבעת של מרחק, ומעמיד אותו מול מכתשים הרחוקים מכל בזלת.

סביב שישה ימות — Crisium, Imbrium, Moscoviense, Nectaris, Serenitatis ו-Smythii — וסביב שלושה מישורים — Procellarum, Tranquillitatis ו-Fecunditatis — נבחרו 11,574 מכתשים של 5–60 ק"מ מחוץ לבזלת, והבחירה הוקפאה לפני שנקראה כל כימיה, יחד עם 5,922 מכתשי ביקורת מותאמים במרחק של יותר מ-600 ק"מ מכל בזלת. בחירת המדגם ושמירתו לפני קריאת הכימיה פירושן שהתוצאה לא יכלה לעצב את המדגם, אפילו שלא במודע. הברזל והטיטניום לקוחים ממצלמת הרב-ערוצים של Kaguya [S3]:

סביב	FeO, אחוז משקלי	ק"מ 0–50	50–150	150–300	300–600	ביקורת
הימות	קרקע	5.96	3.54	3.28	3.40	2.30
	מכתש פחות קרקע	–0.26	–0.10	–0.05	–0.13	–0.01
המישורים	קרקע	9.41	6.10	4.24	2.60	2.30

מכתש פחות קרקע	-0.11	-0.19	-0.07	+0.13	-0.01
-------------------	-------	-------	-------	-------	-------

את הטבלה קוראים מימין לשמאל, החוצה משפת הבזלת; ככל שהכתום עמוק יותר, כך יש יותר ברזל. לכל קבוצה שתי שורות: הברזל של הקרקע שסביב המכתשים, וההפרש בין פנים כל מכתש לבין הקרקע הזאת. העמודה האחרונה היא הביקורת, הרחק מכל בזלת. הטבעות כאן גסות; אותם מכתשים, כשהם נקראים בטבעות העדינות של J.18, נותנים 6.9 אחוזי משקל ב-0–25 ק"מ ו-3.1 ב-100–150 ק"מ, הערכים המובאים בתקציר.

סביב כל ים הקרקע נושאת את הברזל של הים, והוא דועך עם המרחק: פי שניים וחצי מהביקורת בטווח 50 ק"מ, ועדיין פי אחד וחצי מהביקורת ב-300–600 ק"מ. סביב המישורים הקרקע עשירה יותר ליד השפה וענייה יותר הרחק ממנה: ההתק שלם גלש מעבר לשוליהם אל היבשה שלצד, ולא הגיע רחוק. ההבדל בטבעת הרחוקה הוא המכריע: 3.40 סביב הימות לעומת 2.60 סביב המישורים, ו-2.30 בביקורת. ים השליך את החומר שלו רחוק; מישור רק גלש מעבר לשפתו.

STUDY 2 המחקר • מחקר 2

שלב 1 • הגדרת שאלת המחקר והבעיה

התופעה. המכתשים הסמוכים לים כהים ועשירים בברזל. **הפער בידע.** השאלה אם מכתש הסמוך לים נושא את הברזל של הים משום שחומר הים יצר אותו, או משום שחפר דרך כיסוי כהה, לא נבחנה מול קבוצת ביקורת שנבחרה לפני שנקראה הכימיה; וגם הקרקע שסביב ים לא הועמדה לצד הקרקע שסביב מישור. **שאלת המחקר:** האם הברזל בתוך המכתשים הסמוכים לים יורד עם המרחק מהים כפי שיורד הברזל של הקרקע שסביבם, האם פנים כל מכתש שווה לקרקע שלו, וכיצד שונה הקרקע שסביב ים מהקרקע שסביב מישור?

שלב 2 • סקירת ספרות (רקע מדעי)

ידוע שחומר של ים משתרע מעבר לשפה הממופה של הים, כשהוא נישא הצידה על ידי היווצרות מכתשים מאוחרת יותר, למרחק של קילומטרים ספורים עד כמה עשרות קילומטרים [S18]. הברזל והטיטניום נקראים ממצלמת הרב-ערוצים של Kaguya [S3]. **מה חדש כאן:** פנים כל מכתש מושווה לקרקע שלו עצמו, טבעת אחר טבעת של מרחק, עם ביקורות מותאמות הרחוקות מכל בזלת, והימות והמישורים נקראים בנפרד.

שלב 3 • ניסוח השערת המחקר

החומר שים השליך יצר את המכתשים הסמוכים לו; לכן המכתשים הסמוכים לים נושאים את הברזל שלו, הברזל יורד עם המרחק, וכל מכתש נושא את הברזל של הקרקע שעליה נחת, לא יותר. מישור לא השליך דבר: ההתק שלו גלש מעבר לשפתו אל היבשה שלצדו, ולכן הקרקע שליד מישור עשירה, אבל העושר אינו מגיע רחוק.

שלב 4 • מערך המחקר (מתודולוגיה)

סוג המחקר: כמותי, עם קבוצת ביקורת. **המדגם:** 11,574 מכתשים של 5–60 ק"מ מחוץ לבזלת, 5,840 סביב שישה ימות ו-5,734 סביב שלושה מישורים; **הביקורת:** 5,922 מכתשים המותאמים לפי גודל, במרחק של יותר מ-600 ק"מ מכל בזלת. **הכלים:** מפות הברזל והטיטניום של Kaguya, מפת הימות של LROC, וקוד הקורא כל מכתש ואת הקרקע שלו ב-3–4 רדיוסים, כשפיקסלי הבזלת מוסרים.

שלב 5 • איסוף הנתונים (ביצוע המחקר)

המכתשים והביקורות נבחרו ונשמרו לפני שנקראה כל כימיה. אחר כך נקרא כל אחד מהם בפנים ובקרקע שלו, ושויך לים או למישור ששפתו הקרובה ביותר. הערכים הם הטבלה של C.78.

שלב 6 • ניתוח הנתונים ועיבודם

הירידה עם המרחק. סביב הימות הברזל של הקרקע הוא 5.96% במשקל בטווח 50 ק"מ, 3.54 ב-50–150 ק"מ, 3.28 ב-150–300 ק"מ ו-3.40 ב-300–600 ק"מ, לעומת 2.30 בביקורות. מכתש מול הקרקע שלו. סביב הימות, המכתש פחות הקרקע שלו נע בין 0.26– ל-0.05– אחוז משקלי (רווח בר-סמך של 95% ב-0–50 ק"מ: 0.34– עד 0.19–), בביקורות: הרבה מתחת לפיזור הכיול של המפות, 0.81 אחוז משקלי. המכתש נושא את הקרקע שלו. המישרים. סביב המישרים הקרקע מכילה 9.41% במשקל בטווח 50 ק"מ ו-6.10 ב-50–150 ק"מ, יותר מאשר סביב הימות; ב-300–600 ק"מ היא מכילה 2.60, קרוב לביקורות, ואילו סביב הימות היא מכילה עדיין 3.40.

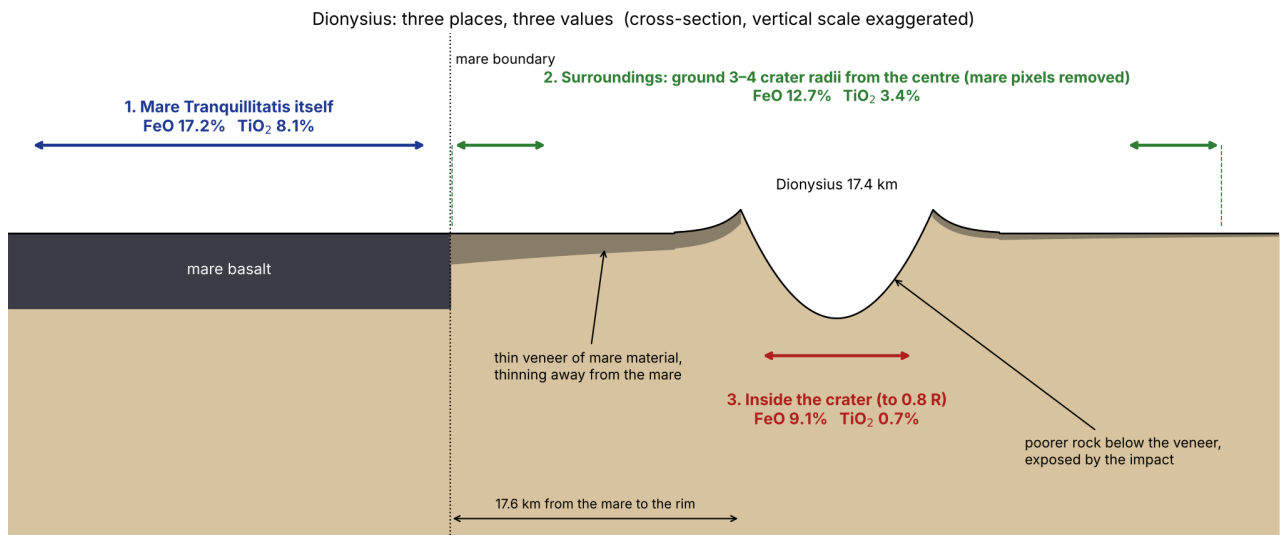
שלב 7 • הסקת מסקנות וכתובת הדוח

תוצאה. ההשערה נתמכת: המכתשים הסמוכים לים נושאים את הברזל שלו, הדועך עם המרחק, וכל אחד נושא את הברזל של הקרקע שעליה נחת; הקרקע שליד מישור עשירה — זה ההתך שגלש ממנו — ויורדת לרמת הביקורות הרחק ממנו, ואילו הקרקע הרחוקה מהימות שומרת על עודף. **מגבלות.** המבחן קורא את פני השטח; הוא אינו מפריד בין כיסוי דק לבין המילוי של המכתש עצמו; הטבעות הרחוקות של ימות ומישרים שכנים חופפות, ובצד הקרוב, שבו נמצאים המישרים, יש בזלת מצדדים רבים. **כיווני מחקר נוספים.** אותו מבחן על טיטניום ותוריום, מכתש אחר מכתש; ההילה של כל ים ושל כל מישור נקראת רק בצד הפונה הרחק מבזלת אחרת; מכתשים סביב ימות הצד הרחוק בלבד (מאמר 6, מחקר 2).

8.8 c. הציפוי והמכתש

מבחן המקור משאיר תוצאה אחת שיש להסביר: מכתש הסמוך לים עני מעט בברזל לעומת הקרקע שסביבו. ההסבר הוא שכבה דקה על פני השטח. הקרקע שסביב ים היא החומר של הים עצמו: שברים קטנים רבים שהושלכו על היבשה שסביבו הניחו ציפוי עשיר בברזל ובטיטניום, עבה בשפת הים והולך ומידלדל כלפי חוץ. הקרקע שליד מישור נושאת ציפוי מאותו סוג, מן ההתך של המישור עצמו שגלש מעבר לשפתו. מכתש שנוצר מאוחר יותר בקרקע הזאת השליך את הציפוי הצידה ופתח את הבסיס העני יותר, ולכן הוא עני יותר מהקרקע שלו בכל מרחק; בביקורות, שבהן אין ציפוי, ההפרש הוא אפס — כמו כף חפירה שננעצת במדשאה שפוזר עליה חול כהה: היא משליכה את החול הצידה ומגלה את האדמה הבהירה יותר שמתחתיו.

Dionysius, מכתש של 17.4 ק"מ במרחק 17.6 ק"מ מהמישור של Tranquillitatis, מראה את שלושת המקומות בבת אחת: המישור מכיל 17.2/8.1 אחוז משקלי FeO/TiO_2 , הקרקע שסביב המכתש 12.7/3.4, פנים המכתש 9.1/0.7, והחומר הנפלט שלו 8.5/1.5 — המכתש השליך החוצה את הבסיס העני, והציפוי העשיר מונח מעבר לו. המספרים יורדים בסדר שהתמונה דורשת: המישור העשיר ביותר, הקרקע שלצדו אחריו, ופנים המכתש והחומר שהשליך החוצה העניים ביותר, משום ששניהם באים מתחת לציפוי.



איור 2. Dionysius לצד Mare Tranquillitatis: הים, הציפוי שסביב המכתש, פנים המכתש והחומר הנפלט שלו (C.8§).

איור 2 הוא חתך דרך הקרקע שליד המישור: קראו אותו מהמישור החוצה, ועקבו אחר הציפוי הכהה כשהוא מידלדל ונקטע במקום שבו המכתש פתח את הבסיס העני יותר שמתחתיו.

C.9 רוחב ההילה וצורתה

ההילה היא האזור סביב ים או סביב מישור שבו הקרקע נושאת את הברזל שלו. ההילה גדלה עם הבזלת שלצדה. רוחבה נמדד במרחק המחצית: המרחק שבו עודף הברזל מעל הקרקע הרחוקה יורד למחציתו. המרחק שבו עודף הברזל יורד למחציתו הוא כ-23 ק"מ סביב Moscoviense וכ-119 ק"מ סביב המישור של Tranquillitatis; עבור הטיטניום — 17 ו-104 ק"מ. מישור רחב פרש ציפוי רחב לצדו; ים קטן בצד הרחוק, על קרום עבה הבנוי משכבות, הניח ציפוי צר — Moscoviense מגיע לרמת הצד הרחוק, כ-2% FeO, בטווח 100 ק"מ. צורת ההילה, מזרח מול מערב, מנוסחת כמבחן בחלק M.

C.10 תיעוד המכתשים סביב הפתחים

ים פעיל מכסה את התיעוד שלו עצמו ויוצר מכתשים במקומות אחרים: זוהי משוואה (1) כפי שהיא נראית בשטח. Mare Crisium מראה זאת בחדות הרבה ביותר: שפתו מוקפת מכתשים שהוא עצמו יצר, ואילו הקרקעית שלו, שנמסה מחדש בזמן שהיה פעיל, מכילה מעטים. ההבדל במספר המכתשים בין החצי המוביל לחצי הנגרר הוא הנושא של מאמר 6 (C.3§, חלקים F-I).

מה שיש בידינו עכשיו: הימות נספרים כפתחים, 33 מתוך 34 על כיפת הזנה; 44 הפתחים הקבורים שהבזלת אינה מראה; והקרקע שסביב כל ים נושאת את החומר שלו, הדועך עם המרחק, כפי שמקור חייב. חלק D עוקב אחר הפתחים עצמם, הנראים והקבורים.

חלק D — הפתחים, הגלויים והקבורים

הבעיה

אם ים הוא פתח, יש למצוא פתחים גם במקומות שאין בהם בזלת. **הגישה:** את כיפות ההזנה של שדה הכבידה קוראים יחד עם פני השטח שמעליהן, עם הקרום שמעליהן ועם הכימיה שעליהן.

חלק C הגדיר ים כפתח מעל כיפת הזנה, והראה שהימות המסומנים במפת הכבידה והגופים הצפופים הנמדדים בשדה הכבידה הם תיעוד אחד. חלק זה עושה את הצעד הבא. אם הפתח, ולא הבזלת, הוא הים, צריכים להיות פתחים במקומות שבהם לא נראית בזלת כלל: פתחים שפעלו, כוסו מאוחר יותר בשכבות שבנו את היבשה סביבם, ומוסתרים היום מתחת לרמה בהירה. לפתח כזה אנו קוראים *פתח קבור*, ולגוף הצפוף שמתחתיו — *כיפת הזנה קבורה*. השאלה של חלק זה היא כיצד אפשר לזהות פתח כזה כששום דבר על פני השטח אינו מראה אותו, וכיצד אפשר להבחין בינו לבין מכתש רגיל.

התשובה נשענת על הכבידה. זוג חלליות כמו GRAIL מודד עד כמה חזק מושך כל חלק של הירח. שדה הכבידה של Bouguer הוא המשיכה הזאת אחרי שמשיכת התבליט הנראה — הגבעות והשקעים של פני השטח — חושבה והוסרה; מה שנשאר מראה היכן החומר שמתחת לפני השטח צפוף או קל מהממוצע. כיפת הזנה קפאה לגוף צפוף, ולכן היא מושכת חזק יותר מהקרקע שסביבה ומופיעה בשדה Bouguer ככתם עגול של כבידה חזקה יותר, בין שיש עליה בזלת ובין שאין. הכבידה רואה אפוא את הפתח דרך הכיסוי שלו. שלוש קריאות נוספות קובעות אחר כך אם שיא כבידה הוא פתח קבור: הקרום שמתחתיו (D.2§), הכיסוי שמעליו, והכימיה והמכתשים של אותו כיסוי (D.5§).

D.1 מפת הפתחים

שני הקטלוגים של חלק C הם תיעוד אחד הנראה פעמיים: 34 ימות שזוהו על מפלי שדה הכבידה, ו-73 כיפות הזנה שנמדדו בו. הקטלוג הראשון נעשה בעין: מפלי השדה מראים היכן המשיכה משתנה בחדות, כלומר את שולי הגופים הצפופים. הקטלוג השני נעשה בקוד: כל שיא כבידה עגול בגודל 100 ק"מ ומעלה, הבולט ב-50 מיליגל ומעלה מעל הטבעת שסביבו, נלקח ככיפת הזנה (C.3§). (המיליגל, mGal, הוא יחידה קטנה של תאוצת כבידה, המשמשת להפרשים מקומיים כאלה.) שלושים ושלושה מתוך 34 הימות יושבים על כיפה (C.5§). טבלת כל הימות, עם שם, מיקום, אזור, דור והכיפה שמתחת, היא נספח A.

D.2 אגן או מכתש, לפי מה שמתחת

מישור כהה, גדול ועגול יכול להיות אחד משני דברים. הוא יכול להיות פתח, פני השטח של כיפת הזנה; או שהוא יכול להיות מכתש רגיל שקרקעיתו במקרה כהה, משום שהחומר החוזר נחת על אזור לבה וחשף לבה בקרקעית. על פני השטח השניים יכולים להיראות דומים. סעיף זה מפריד ביניהם לפי מה שמתחת.

מה שמתחת הוא המכריע. הסיבה פשוטה: כיפת הזנה נדחפה מעלה ממוקד תת-קרקעי, ולכן הרימה את החומר הצפוף שמתחת לפתח והדקה את הקרום הקל שמעליו; מכתש נוצר מלמעלה, על ידי חומר שנחת על פני השטח, ומשאיר את הקרום שמתחתיו כפי שהיה. לכן מתחת למרכז של פתח הקרום דק יותר מאשר בטבעת שבמרחק 1.3–2.0 רדיוסים סביבו; מתחת למכתש — לא. להפרש — עובי הקרום בטבעת פחות עובי מתחת למרכז — אנו קוראים *קפיצת הקרום*.

מתוך 36 הפתחים המסומנים (הנקודות המסומנות על מפת הכבידה; היחס בין לבין 34 הימות מובא בחלק C), 26 מראים קפיצה של 8 ק"מ ומעלה במודלי הקרום של GRAIL — ביניהם 29+ Moscoviense ק"מ, Orientale; 28+ Nectaris, 24+ Humboldtianum, 24+ Apollo, 23+ Smythii, 23+ Crisium, 22+ Serenitatis ו-21+; ארבעה אינם ברורים; ושישה מראים פחות מ-4 ק"מ, כולם ברדיוס 43–92 ק"מ, ו-Tsiolkovskiy ביניהם. כל פתח הגדול מכ-120 ק"מ מראה את הקפיצה. מתחת ל-Moscoviense, למשל, הקרום דק במרכז ב-29 ק"מ מאשר בטבעת שסביבו. Tsiolkovskiy, שקרקעיתו כהה מלבה, הוא מכתש: הוא נחת על אזור לבה. שישת המבנים הקטנים שאין בהם קפיצה אינם אפוא פתחים שנכשלו במבחן; הם מכתשים שהעין, שקראה את הקרקעית הכהה, החשיבה לפתחים, והקרום שמתחתם ממין אותם.

3 THE RESEARCH • STUDY 3 המחקר • מחקר 3

STEP 1 הגדרת שאלת המחקר והבעיה

התופעה. חלק מהמישורים הכהים והעגולים הם אגנים גדולים של הימות, ואחרים הם מכתשים שקרקעיתם כהה מבזלת. **הפער בידע.** לפי פני השטח השניים נראים דומים; מה שמתחת לא שימש עד כה למיון הפתחים המסומנים אחד אחד. **שאלת המחקר:** האם הקרום מתחת למרכז של כל פתח מסומן דק יותר מאשר בטבעת שסביבו, והאם הדבר מפריד בין הפתחים לבין מכתשים רגילים באותו גודל?

STEP 2 סקירת ספרות (רקע מדעי)

מודלי הקרום של GRAIL מראים את הקרום מודק מתחת לאגנים הגדולים, והדבר מתפרש כמעטפת שהורמה על ידי האירוע שיצר את האגן [S19]; המסקונים שמעליהם מתפרשים כאותה הרמה עם בזלת מעליה [S20]. (מודל עובי קרום ממיר את הכבידה הנמדדת לעומק הגבול בין הקרום הקל לבין המעטפת הצפופה יותר שמתחתיו, בהינתן צפיפות מונחת לכל אחד מהם; מסקון, קיצור של mass concentration, "ריכוז מסה", הוא אזור שהכבידה בו חזקה מזו של סביבתו משום שחומר צפוף יותר נמצא מתחתיו.) **מה חדש כאן:** ההידוק נמדד לכל פתח בקטלוג, ואותו מדד נלקח על מכתשים רגילים הרחוקים מכל פתח.

STEP 3 ניסוח השערת המחקר

פתח יושב מעל כיפת הזנה שהדקה את הקרום שמתחתיו; מכתש נחת על פני השטח ולא הדק אותו. לכן הפתחים הגדולים מראים קפיצת קרום בין הטבעת למרכז, והמכתשים הרגילים אינם מראים אותה.

STEP 4 מערך המחקר (מתודולוגיה)

סוג המחקר: כמותי, עם קבוצת ביקורת. **המדגם:** 36 הפתחים המסומנים; **הביקורת:** 169 מכתשים ברדיוס 40–300 ק"מ מקטלוג Wang & Wu [S6], בקו רוחב של עד 70°, שאף אחד מהם אינו קרוב לפתח יותר מפעמיים רדיוסו. הביקורת היא לב המבחן: היא שואלת כיצד נראה מתחתיו מכתש רגיל בגודל דומה, כשהוא נמדד בדיוק באותה דרך, כך שאי אפשר לייחס קפיצה מתחת לפתחים לשיטה או לגודל בלבד. **הכלים:** ארבעת מודלי עובי הקרום של GRAIL, בממוצע, וקוד הקורא את הקרום מתחת למרכז (עד 0.3 מהרדיוס) ובטבעת של 1.3–2.0 רדיוסים. ארבעת המודלים שונים בצפיפויות ובנקבוביות שהם מניחים; מיצוע ביניהם מונע מהתוצאה להישען על מערכת הנחות אחת.

STEP 5 איסוף הנתונים (ביצוע המחקר)

הקרום נקרא מתחת לכל פתח ומתחת לכל מכתש ביקורת באותן טבעות. קפיצה של 8 ק"מ ומעלה נחשבת קפיצה; פחות מ-4 ק"מ — אין קפיצה. הרווח בין שני הספים מרחיק את המקרים הגבוליים, ה"לא ברורים", משתי הקבוצות.

STEP 6 ניתוח הנתונים ועיבודם

הפתחים. בקריאה הראשונה (הטקסט שלמעלה), 26 מתוך 36 מראים קפיצה של 8 ק"מ ומעלה, ארבעה אינם ברורים ושישה מראים פחות מ-4 ק"מ, כולם ברדיוס 43–92 ק"מ. בקריאה חוזרת, בדיוק באותן טבעות ששימשו לביקורת, 29 מתוך 36 מראים את הקפיצה וחמישה מראים פחות מ-4 ק"מ; הקפיצה החציונית היא 17 ק"מ. כל פתח הגדול מ-120 ק"מ מראה אותה. הביקורת. מתוך 169 המכתשים הרגילים, ארבעה מראים קפיצה של 8 ק"מ ומעלה, כ-2%; הקפיצה החציונית שלהם היא 1 ק"מ. מה המקרה היה נותן. הביקורת קובעת את שיעור המקרה: אילו הפתחים המסומנים היו מכתשים רגילים, כ-2% מהם — פחות מאחד מתוך 36 — היו מראים את הקפיצה. המספר הנצפה הוא 29. בפתח טיפוסי הקרום מודק ב-17 ק"מ; במכתש טיפוסי ב-1 ק"מ, בתוך הרעש של המודלים. לפי גודל. בין המבנים ברדיוס 40–120 ק"מ, לא הפתחים הקטנים ולא המכתשים מראים את הקפיצה; מעל 120 ק"מ כמעט כל מבנה הוא פתח, וכמעט כל פתח מראה אותה.

STEP 7 הסקת מסקנות וכתובת הדוח

תוצאה. ההשערה נתמכת: קפיצה בקרום מסמנת פתח, ומכתש רגיל חסר אותה. הפתחים הקטנים שאין בהם קפיצה, ו-Tsiolkovskiy ביניהם, הם מכתשים שנחתו על אזור לבה. **מגבלות.** גודל וסוג קשורים זה בזה: יש מעט מכתשים רגילים גדולים כמו הפתחים הגדולים, ולכן ההשוואה חזקה ביותר מתחת ל-120 ק"מ; מודלי הקרום מניחים צפיפות לקרום, והקפיצה תלויה בה. מומחה עשוי לטעון שהאגנים הגדולים צפויים להדק את הקרום, יהיה אשר יהיה מה שיצר אותם. תשובת המחקר הזה היא הביקורת: המכתשים ברדיוס 40–300 ק"מ, שנמדדו באותה דרך, מראים את הקפיצה רק ב-4 מתוך 169, ולכן הקפיצה שייכת לפתחים ולא לכל מבנה עגול וגדול. **כיווני מחקר המשך.** הקפיצה כפי שהיא נקראת בשדה של דרגות 6–900, ומול חוזק הכיפה שמעליה.

Procellarum D.3, מישור בזלת

Oceanus Procellarum, 1.8 מיליון קמ"ר של בזלת, אינו ים אחד אלא מישור בזלת. הוא אינו המגע: המגע הוא האזור של 3,000 ק"מ בקצה האגס, שמרכזו בערך ב-22°N–24° (חלק B), ו-Procellarum שוכן בתוך אזור הצד הקרוב שחום כדור הארץ התיך. גבולו המלבני נראה בכבידה בלי ביטוי טופוגרפי [S11]: קו הנראה במשיכת הקרקע שמתחת אך לא בגובה פני השטח, כפי שהיה נראה גבולו של אזור שעוצב מלמטה ולא נחפר מלמעלה. הוא מכיל כמה כיפות הזנה, שהספרות מונה כים אחד והעין רואה כפתח אחד. המישור עצמו הוא קרום שהותך במקומו, בלי כיפת הזנה משלו (C.2§); הכיפות שבתוך קו המתאר שלו שייכות לפתחים נפרדים, והמודל מונה אותן אחת אחת.

D.4 כיפות ההזנה הקבורות

הטבלה שלהלן ממיינת את 73 כיפות ההזנה לפי הכיסוי שמעליהן ולפי הצד. כיפה היא קבורה כשפחות מ-5% משטחה נושא בזלת — רק רמה בהירה מונחת עליה; מתחת לים כש-25% ומעלה הם בזלת; חלקית — בין השניים (C.3§). התאים המודגשים מראים היכן מתקבצים שני הסוגים: הכיפות הקבורות בצד הרחוק, הפתוחות בצד הקרוב.

קבורה (בזלת >5%)	חלקית	מתחת לים	סה"כ	
הצד הרחוק	36	1	3	40
הצד הקרוב	8	3	22	33
הירח כולו	44	4	25	73

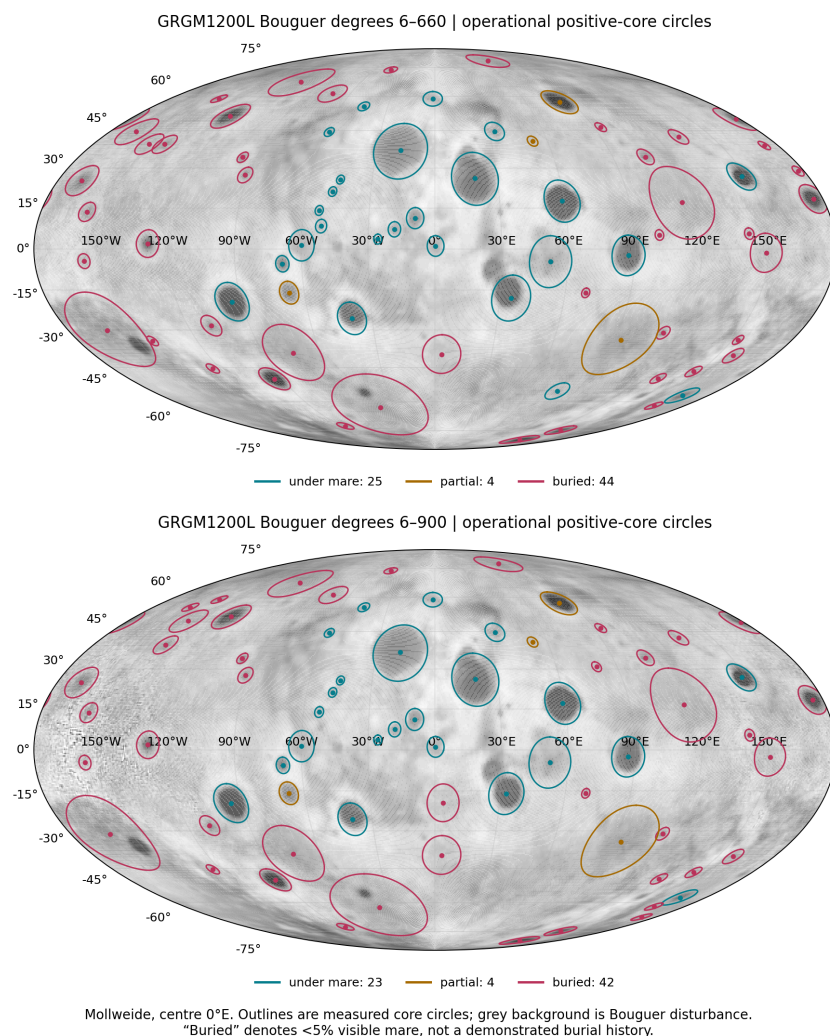
טבלה: 73 כיפות ההזנה לפי הכיסוי שמעליהן ולפי הצד.

בצד הרחוק 36 מתוך 40 כיפות ההזנה קבורות: Coulomb–Sarton, Hertzprung, Freundlich–Sharonov, Milne, Schrödinger, Mendeleev, Korolev, Dirichlet–Jackson, Fitzgerald–Jackson ואחרות. בצד הקרוב רק

שמונה קבורות, והן נמצאות בשוליו ובקרבת הקטבים: ביניהן Balmer–Kapteyn ואזור Schiller–Schickard, ששניהם מוכרים בספרות כקריפטו-ימות (cryptomaria) — בזלת קבורה, שנחשפה על ידי מכתשים קטנים שחפרו חומר כהה מתחת לכיסוי בהיר. העובדה ששתיים מהכיפות הקבורות חופפות לקריפטו-ימות שכבר ידועים מראיות אחרות היא בדיקה בלתי תלויה: במקום שבו הספרות מצאה בזלת נסתרת בחפירה, הכבידה מוצאת כיפה קבורה. הן היו פתוחות כשפני השטח היו שטוחים, ונקברו אחר כך. הצד הרחוק, עם הכיפות הקבורות הרבות שלו, מתעד פעילות חזקה של ימות בשלבים המוקדמים; ימות הצד הקרוב נוצרו או נחשפו אחר כך.

הטבלה משנה גם את התמונה של שני פניו של הירח. בספירה לפי בזלת נראית, בצד הרחוק יש מעט ימות; בספירה לפי כיפות הזנה, יש בו יותר מאשר בצד הקרוב, 40 לעומת 33. ההבדל בין שני הפנים הוא במה שמכסה את הפתחים, לא במספרם (C.6§).

Lunar positive Bouguer anomalies and visible mare coverage



איור 3. כיפות ההזנה בכבידת Bouguer של GRAIL (דרגות 6–660 למעלה, 6–900 למטה): מתחת לים (כחול), חלקית (ענבר) וקבורה (אדום). הטלת Mollweide שמרכזה ב-0° מזרח.

איור 3 מציג את הירח כולו בהטלה שומרת שטח (Mollweide), הצד הקרוב באמצע והצד הרחוק בשוליים השמאלי והימני. הרקע האפור הוא כבידת Bouguer; כל קו מתאר הוא הליבה הנמדדת של כיפת הזנה, צבועה לפי הכיסוי שלה. הביטוי בפיזור הצבעים: קווי המתאר הכחולים מצטופפים במרכז המפה, בצד הקרוב, ואילו האדומים ממלאים את הצד הרחוק ואת שולי הקטבים. שני הלוחות מראים את אותו שדה בשתי רזולוציות.

ה"דרגות" הן האיברים שמהם נבנית מפת כבידה, מהשינויים הרחבים ביותר ועד העדינים ביותר: דרגות 6–660 משמיטות את השינויים הרחבים ביותר, בקנה מידה של הירח כולו, ושומרות מאפיינים עד קנה מידה עדין; 6–900 שומרות פרטים עדינים עוד יותר, במחיר רעש רב יותר. כמעט אותן כיפות מופיעות בשתייהן, ולכן הקטלוג אינו תלוי ברזולוציה שנבחרה.

D.5 מה מונח עליהן

אם כיפה קבורה היא פתח שכוסה מאוחר יותר, נובעים מכך שלושה דברים, והטבלה שלהלן בודקת כל אחד מהם. פני השטח מעליה צריכים להיות אותה שכבה שמכסה את היבשה שסביבה, ולכן הברזל והתוריום שלה צריכים להתאים לסביבה. הקרום מעליה צריך להיות עבה יותר מאשר מעל כיפה פתוחה, בעובי הכיסוי. והמכתשים שנוצרו בזמן שהייתה פתוחה צריכים היו להיקבר יחד איתה, ולכן מכתשים אינם אמורים להתקבץ עליה. בטבלה, התאים הירוקים הם ההפרשים שיוצאים אפס, כפי שהכיסוי דורש; התא הכתום הוא הקרום העודף מעל כיפה קבורה. (תוריום, יסוד רדיואקטיבי, נמדד ממסלול באמצעות קרני הגמא שהוא פולט; ppm הוא חלקים למיליון לפי משקל; FeO הוא תחמוצת ברזל, באחוזי משקל).

מדד	מעל הכיפות הקבורות	לעומת כיפות מתחת לים
FeO על הליבה פחות סביבתה	–0.19 אחוזי משקל (–0.37 עד +0.14)	+1.47 (+0.59 עד +2.49)
תוריום על הליבה פחות סביבתה	+0.05 ppm (–0.02 עד +0.09)	נמוך ב-3.52 ppm (–5.69 עד –1.85)
הקרום מעל המרכז	עבה יותר ב-8–13 ק"מ	—
מכתשים גדולים על הכיפה לעומת 3–5 רדיוסים	0.48–0.95	—

טבלה: מה מונח על הכיפות הקבורות — ברזל, תוריום, קרום ומכתשים, לעומת סביבתן ולעומת כיפות מתחת לים.

פני השטח מעל כיפה קבורה הם אותה שכבה שמכסה את היבשה שסביבה: אותו ברזל ואותו תוריום. כיפה פתוחה, לעומת זאת, נושאת ברזל משלה: מעליה הליבה עשירה מהטבעת שלה ב-1.47 אחוזי משקל FeO, גם כשפיקסלי הים הוסרו. הקרום מעל כיפה קבורה עבה יותר בעובי של מה שמכסה אותה. והמכתשים אינם מתקבצים סביבה, משום שהמכתשים שנוצרו בזמנה נקברו יחד איתה: צפיפות המכתשים הגדולים על הכיפה היא 0.95–0.48 מזו שבמרחק 3–5 רדיוסי כיפה, ולעולם אינה גבוהה ממנה. כיפה קבורה אינה אפוא גוף צפוף שבמקרה מונח מתחת לרמה; היא פתח שמעליו שמיכה, וכל קריאה של השמיכה אומרת אותו דבר. כיפה קבורה אחת יוצאת דופן, הגדולה שבהן, בתוך South Pole–Aitken (30° דרום, 199° מזרח), עם 0.86 ppm תוריום מעל סביבתה.

4 THE RESEARCH • STUDY המחקר • מחקר

STEP 1 הגדרת שאלת המחקר והבעיה

התופעה. מתוך 73 כיפות ההזנה, 44 נמצאות מתחת לרמה בהירה בלי בזלת עליהן. **הפער בידע.** אם אלה פתחים שפעלו מוקדם וכוסו אחר כך, פני השטח מעליהם חייבים להיות אותה שכבה שמכסה את היבשה סביבם, הקרום מעליהם חייב להיות עבה יותר בעובי הכיסוי, והמכתשים של זמנם חייבים להיקבר יחד איתם. **שאלת המחקר:** מה מונח על הכיפות הקבורות — ברזל, תוריום, קרום ומכתשים — בהשוואה ליבשה שסביבן ולכיפות באותו חוזק מתחת לים פתוח?

STEP 2 סקירת ספרות (רקע מדעי)

בזלת קבורה, הקריפטו-ימות, מוכרת ממכתשים בעלי הילה כהה שחפרו אותה מתחת לכיסוי של רמה, והיא מתפרשת כלבה מוקדמת שכוסתה בחומר הנפלט של אגנים מאוחרים יותר [S17]. הקרום נקרא ממודלי GRAIL

[S19], הברזל מ-Kaguya [S3], התוריום מ-Lunar Prospector [S4]. **מה חדש כאן:** כל כיפה קבורה מושווית הן לסביבתה שלה והן לכיפות פתוחות באותו חוזק.

STEP 3 ניסוח השערת המחקר

כיפה קבורה היא פתח שכוסה בשכבות שבנו את היבשה סביבו; לכן מעליה הברזל והתוריום שווים לאלה של סביבתה, הקרום עבה יותר מאשר מעל כיפה פתוחה באותו חוזק, והמכתשים אינם מתקבצים עליה.

STEP 4 מערך המחקר (מתודולוגיה)

סוג המחקר: כמותי, המשווה את הליבה של כל כיפה לטבעת שסביבה, ואת הכיפות הקבורות לפתוחות. **המדגם:** 44 הכיפות הקבורות; **קבוצת ההשוואה:** 25 הכיפות שמתחת לים פתוח. **הכלים:** מפת הברזל של Kaguya, מפת התוריום של Lunar Prospector, ארבעת מודלי הקרום של GRAIL, קטלוג Wang & Wu [S6], וקוד הקורא את הליבה ואת הטבעת שבמרחק 2–3 רדיוסי כיפה, כשפיקסלי הים מוסרים משתיהן. הסרת פיקסלי הים בשני הצדדים שומרת על השוואה של שווה מול שווה: לכיפות הפתוחות אין נזקף הברזל של הבזלת שעל פני השטח שלהן, ומה שמושווה הוא הקרקע עצמה.

STEP 5 איסוף הנתונים (ביצוע המחקר)

כל כיפה נקראה בליבתה ובטבעת שלה בכל מפה; רווחי ה-95% נמצאו בדגימה חוזרת של הכיפות. דגימה חוזרת פירושה שליפה של מערכות חדשות רבות של כיפות באקראי מתוך המערכת הנמדדת, עם חזרות מותרות, וחישוב התוצאה מחדש בכל פעם; הטווח המכיל 95% מהתוצאות האלה מראה עד כמה התשובה הייתה יכולה לזוז אילו עמדה לרשותנו מערכת כיפות אחרת. הערכים הם הטבלה של D.58.

STEP 6 ניתוח הנתונים ועיבודם

ברזל. מעל הכיפות הקבורות הליבה פחות הטבעת היא -0.19 אחוזי משקל FeO (רווח -0.37 עד +0.14); אפס בתוך הרווח. מעל הכיפות הפתוחות, אותו מדד, כשפיקסלי הים הוסרו, הוא +1.47 (+0.59 עד +2.49). שני הרווחים אינם חופפים: הכיפות הפתוחות נושאות ברזל משלהן, הקבורות נושאות את הברזל של היבשה שסביבן. **תוריום.** מעל הכיפות הקבורות +0.05 ppm (-0.02 עד +0.09); נמוך ב-3.52 ppm (-5.69 עד -1.85) מאשר מעל כיפות פתוחות באותו חוזק. **קרום.** עבה יותר ב-8–13 ק"מ מעל כיפה קבורה מאשר מעל כיפה פתוחה באותו חוזק, בכל ארבעת המודלים. **מכתשים.** 0.48–0.95 מהצפיפות שבמרחק 3–5 רדיוסים: לעולם אינם מצטופפים על הכיפה.

STEP 7 הסקת מסקנות וכתיבת הדוח

תוצאה. ההשערה נתמכת: פני השטח מעל כיפה קבורה הם השכבה של היבשה שסביבה, הקרום מעליה עבה יותר בעובי השכבה הזאת, והמכתשים של זמנה נקברו יחד איתה. כיפה אחת יוצאת דופן, הגדולה שבהן, בתוך South Pole–Aitken, עם 0.86 ppm תוריום מעל סביבתה. **מגבלות.** מפת התוריום מפרידה פרטים של כ-60 ק"מ, ו-20 מתוך 73 הכיפות קטנות מפעמיים זה; ההתאמה בחוזק בין כיפות קבורות לפתוחות היא גסה בלבד. **כיווני מחקר המשך.** עומקו של כל גוף צפוף לפי הכבידה שלו, מול עובי הכיסוי שמעליו.

מה שיש בידינו עכשיו: אפשר למצוא פתח בלי בזלת. הכבידה מראה את הכיפה הצפופה שמתחתיו; קפיצת הקרום מראה שהכיפה הדקה את הקרום מלמטה, דבר שמכתש אינו עושה; והכיסוי מעל כיפה קבורה הוא השכבה הרגילה של היבשה שסביבה, עבה יותר בעוביו שלו, ואין בו התקבצות של מכתשים. רוב הפתחים האלה נמצאים בצד הרחוק.

D.6 אופיו של פתח לפי האזור שלו

המודל מחלק את הירח של היום לאזורים לפי המקום שבו עמד כל חלק של פני השטח על הגוף בזמן שהיה מחובר (חלק B), ואת הפתחים לדורות לפי מועד חשיפתם: דור I מעבר לגבעה, דור II על הגבעה, דור III באזור המגע (נספח A). אם הדורות אמיתיים, אופי הפתחים צריך להשתנות עם האזור: פתחים עם מסקון ועם טבעת בחגורה, מסקונים בלי טבעת בדיסקת המגע, כיפות קבורות בצד הרחוק. האחרון נמדד עכשיו (D.4§); שני הראשונים מנוסחים כמבחנים בחלק M.

D.7 פתחי יציאה ופיות

המאמר משתמש בשני סוגי פתחים (A.1§): פתח יציאה השליך חומר החוצה; פה העביר חומר בזמן שעוד היה מכוסה, לעבר פתחי היציאה, ונחשף רק מאוחר יותר. כל פתח מסווג כיציאה, כפה, או כשניהם, לפי הדור שלו, המבנה שלו והמילוי שלו. הסיווג לפי מראה והסיווג לפי מיקום אינם חייבים להסכים; כשהם אינם מסכימים, אי-ההסכמה נרשמת כתוצאה, ואינה מוכרעת בבחירה. ב-Imbrium וב-Nectaris השניים מסכימים. Imbrium נראה חדש ונמצא במגע: 14.8° (447 ק"מ) ממרכז המגע, עמוק בתוך הדיסקה של $1,500$ ק"מ, דור Nectaris. III. נראה ביניים ונמצא על הגבעה: 69° ($2,100$ ק"מ) ממרכז המגע, מחוץ לדיסקה, ו- 38° ($1,150$ ק"מ) ממרכז הגבעה, דור II (נספח A). כשמודדים מהנקודה התת-ארצית, שלפיה כלל החלק היחסי קובע את גודל האזורים, Imbrium נמצא ב- 42° , בחגורה; קריאה זו היא שהולידה את הניסוח הקודם (גרסה קודמת מיקמה את Imbrium בחגורה ואת Nectaris במגע). כך אי אפשר לכופף את הסיווג כדי שיתאים למודל: כל פתח נקרא פעמיים, באופן בלתי תלוי, ושתי הקריאות נשמרות.

חלק E — כיפת ההזנה

הבעיה

פתח עלה דרך כיפה, ואת הכיפה צריך לראות. **הגישה:** כל ים נמדד מעל הליבה של כיפת ההזנה שלו: חוזק הכיפה, וגובה המרכז לעומת השוליים.

חלק D מצא את הפתחים, הפתוחים והקבורים, דרך הגופים הצפופים שמתחתיהם. חלק זה מתבונן בגוף הצפוף עצמו, כיפת ההזנה, ושואל אם פני השטח של כל ים נושאים את חותמו.

כדאי לקבוע תחילה את התמונה הפיזיקלית. כיפת הזנה נוצרת במקום שבו חומר נדחף מעלה ממוקד תת-קרקעי — מקום בעומק שממנו עולה ההזנה. הדחיפה מרימה את המרכז ומרחיבה את השוליים, כמו יד הלוחצת מעלה מתחת ליריעה של בצק רך: היא מרימה את אמצעה ומותחת אותה החוצה. דרך הכיפה עלה החומר אל הפתח, וברוב הפתחים הושלך החוצה (A.1§); Serenitatis-ו Imbrium לא השליכו (רק פצפוצים קלים). כל עוד ההזנה פעילה, ההתך עומד בגובה השפה. כשההזנה נפסקת, החומר שנשאר בכיפה קופא במקומו לגוף העשיר יותר בברזל ובטיטניום, ולכן צפוף יותר, מהקרום שסביבו. הגוף הצפוף הזה הוא מה ששדה הכבידה רואה היום: הוא מושך חזק יותר מסביבתו, ולכן בולט בשדה Bouguer כשיא עגול, החזק ביותר מעל מרכזו (איור 5). *החוזק* שלו, עודף הכבידה במרכזו מעל הטבעת שסביבו, מודד כמה חומר צפוף הוא מכיל. מעליה פני השטח, קרקעית הים, נמוכים יותר במרכז; שלושה גורמים יכולים להנמיך את המרכז — משקל הגוף הצפוף, יניקה, ולדעתנו בעיקר התפשטות והתכווצות בחום ובקור, החזקה יותר ככל שהמסה גדולה יותר בקוטר ובעומק (E.3§). את השקיעה הזו חלק זה מודד.

E.1 כיפת ההזנה מתחת לכל ים

כל ים במאמר זה עומד מעל כיפת הזנה הנראית בשדה הכבידה של GRAIL, מלבד שלושה הנמצאים מעל South Pole–Aitken, שהכיפות שלהם "בושלו" ונעלמו בחום שמתחת לאגן הזה (C.2§). (ליתר דיוק, רק מתחת ל-Ingenii אין כיפה כלל; Apollo ו-Bailey נופלים בתוך הליבה של כיפה שכנה גדולה, C.5§, אבל לאף אחד מהשלושה אין כיפה משלו.) הכיפות שונות מאוד בחוזקן, עודף הכבידה במרכזן מעל הטבעת שסביבן. בין שנים-עשר הימות הפתוחים, החזקות ביותר הן Orientale (740 מיליגל), Moscoviense (689), Nectaris (538), Crisium (527), Smythii (484), Serenitatis (412), Humorism (400), Grimaldi (333) ו-Imbrium (309). הימות הקבורים של הצד הרוחני נושאים כיפות חזקות לא פחות: Mendel–Rydberg 479, Hertzprung 470. ים קבור אינו אפוא פתח חלש או כושל: הכיפה שלו מכילה חומר צפוף כמו הכיפות של הימות הפתוחים הגדולים; רק הכיסוי שלו שונה.

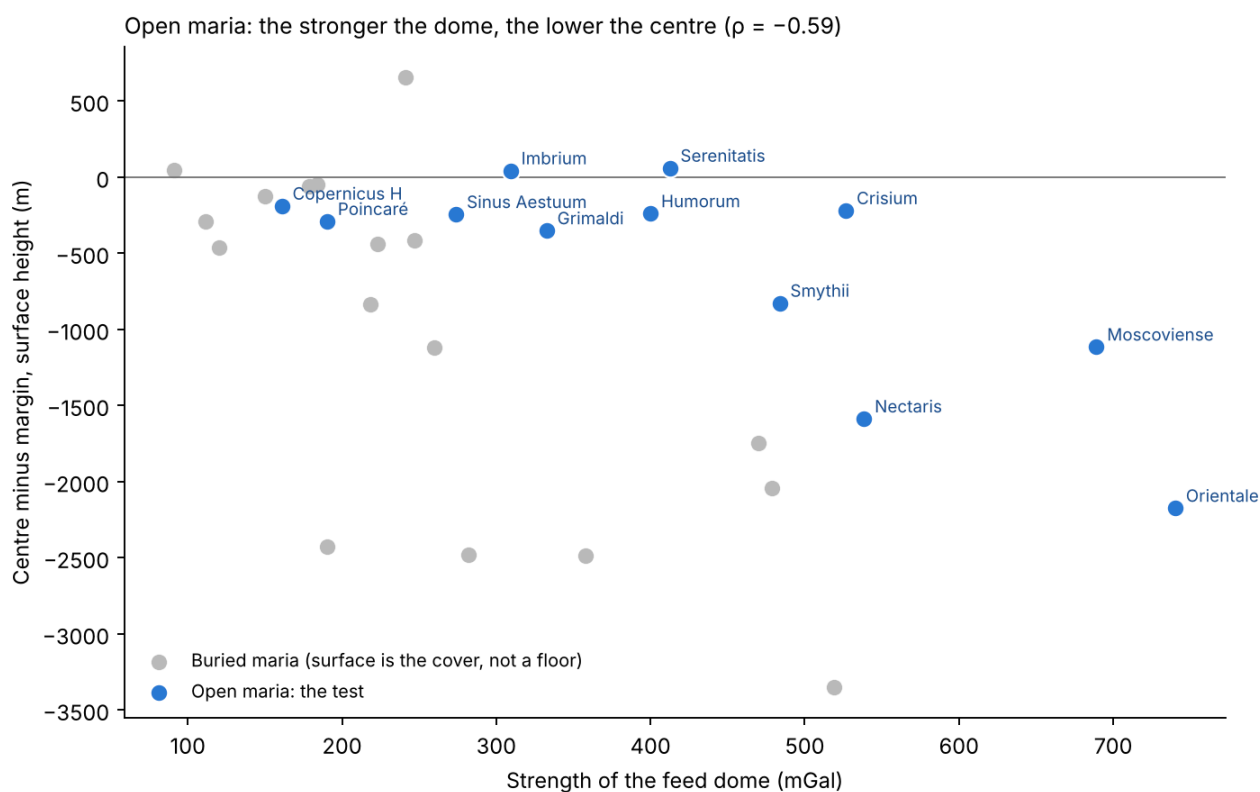
E.2 המרכז שקע מעל הכיפה

אם המרכז שקע מעל הכיפה בזמן שקפאה, הקרקעית שמעליה צריכה להיות הנמוכה ביותר במקום שבו הכיפה עבה ביותר, מעל מרכזה, וככל שהכיפה חזקה יותר, השקיעה עמוקה יותר. הטבלה מביאה את המדידה. השורות הכחולות הן המבחן, על הימות הפתוחים, שבהם פני השטח הם קרקעית הים עצמה; השורה האחרונה, הימות הקבורים, מוצגת בנפרד משום שפני השטח שלהם הם הכיסוי שהונח מעל הכיפה.

ימות פתוחים: המרכז לעומת השוליים	נמוך יותר ב-10 מתוך 12, חציון -267 מ'
ימות פתוחים: גובה המרכז לעומת חוזק הכיפה	$p = 0.04, \rho = -0.59$
שני היוצאים מן הכלל	Serenitatis 60+ מ' ו-Imbrium 43+ מ', שניהם ימות של המגע
ימות קבורים (פני השטח הם הכיסוי, מוצגים בנפרד)	נמוך יותר ב-15 מתוך 17, $\rho = -0.70$

טבלה: גובה המרכז לעומת השוליים בימות, ויחסו לחוזק כיפת ההזנה.

מרכזו של ים עומד נמוך משוליו, וככל שהכיפה שמתחתיו חזקה יותר, המרכז נמוך יותר. שני הימות שמרכזם עומד גבוה הם שני הימות הגדולים של המגע. כאן ρ הוא מתאם דרגות: הימות מדורגים פעם אחת לפי חוזק הכיפה שלהם ופעם אחת לפי גובה המרכז שלהם, ו- ρ אומר עד כמה שני הדירוגים מסכימים — +1 אם הם מסכימים לגמרי, -1 אם הם הפוכים לגמרי, 0 אם אין ביניהם קשר. ערך של -0.59 — פירושו שהכיפות החזקות יותר נוטות בבירור לשאת מרכזים נמוכים יותר. הערך p הוא ההסתברות שקשר חזק לפחות כמו זה יופיע במקרה אילו לא היה קשר כלל.



איור 4. גובה המרכז של כל ים לעומת שוליו, מול חוזק כיפת ההזנה שמתחתיו. כחול: הימות הפתוחים, המבחן; אפור: הימות הקבורים, שפני השטח שלהם הם הכיסוי שמעל הכיפה (E.2§).

איור 4 ממקם כל ים לפי חוזק הכיפה שלו (בציר האופקי) ולפי כמה מרכזו עומד מעל שוליו או מתחתם (בציר האנכי); הקו האופקי באפס מסמן קרקעית מפולסת. הביטוי בנקודות הכחולות: הן יורדות משמאל למעלה לימין למטה. הכיפות החלשות, Copernicus H ו-Poincaré, נושאות קרקעיות שהונמכו רק מעט; החזקות ביותר, Nectaris, Moscoviense ו-Oriente, נושאות קרקעיות שהונמכו בקילומטר אחד ועד יותר משני קילומטרים. רק Imbrium ו-Serenitatis, שני הימות של המגע, יושבים מעט מעל הקו. הנקודות האפורות, הימות הקבורים, נמצאות גם הן ברובן מתחת לקו, אבל הן אינן חלק מהמבחן.

STEP הגדרת שאלת המחקר והבעיה

התופעה. כל ים במאמר זה עומד מעל כיפת הזנה צפופה, וקרקעיות הימות אינן מפולסות לגמרי. **הפער בידע.** אם צורת פני השטח של ים עוקבת אחר חוזק הגוף הצפוף שמתחתיו — הדבר לא נמדד ים אחר ים. **שאלת המחקר:** האם מרכזו של ים עומד נמוך משוליו, והאם הוא עומד נמוך יותר ככל שכיפת ההזנה שמתחתיו חזקה יותר?

STEP סקירת ספרות (רקע מדעי)

בספרות, הגופים הצפופים שמתחת לאגנים הגדולים, המסקונים, הם מילוי בזלתי מעל מעטפת שהורמה על ידי האירוע שיצר את האגן. העומס שלהם כופף את הקרקעית מטה במרכז ואת השוליים מעלה, פתח גראבנים בשוליים ולחץ רכסים בפנים [S20, S21]. (גראב) הוא שקע ארוך שבו הקרקע נמשכה לצדדים ורצועה שקעה בין שני שברים; רכס קמטים הוא רכס נמוך ומתפתל שבו פני השטח נדחסו יחד). פני השטח ממופים במדידת גובה בלייזר [S7], המודדת את גובה פני השטח לפי זמן החזרה של פולסי לייזר הנשלחים ממסלול. **מה חדש כאן:** הימות הם הפתחים שזוהו על מפלי הכבידה (C.2§), כל אחד נמדד מעל הליבה של כיפת ההזנה שלו, וגובה המרכז נקרא מול חוזק אותה כיפה.

STEP ניסוח השערת המחקר

כיפת ההזנה קפאה לגוף צפוף עשיר בברזל, העבה ביותר מתחת למרכז, והמרכז שקע מעליו — במשקלו, ביניקה או, בעיקר, בהתכווצות תרמית. לכן מרכזו של ים עומד נמוך משוליו, ונמוך יותר ככל שהכיפה חזקה יותר.

STEP מערך המחקר (מתודולוגיה)

סוג המחקר: כמותי; המרכז לעומת השוליים בכל ים, ומתאם דרגות על פני הימות. **המדגם:** 34 הימות של נספח A; המבחן נעשה על 12 הימות הפתוחים, שפני השטח שלהם הם קרקעית הים עצמה. 17 הימות הקבורים מוצגים בנפרד, משום שפני השטח שלהם הם הכיסוי שהונח מעל הכיפה, וגובהם הוא גובה הכיסוי. שני הימות המכוסים חלקית ושלושת הימות שמעל South Pole–Aitken אינם נכללים במתאם. יחד אלה מכסים את כל ה-34: 12 פתוחים, 17 קבורים, 2 חלקיים ו-3 מעל South Pole–Aitken. **הכלים:** מדידת הגובה בלייזר [S7], כיפות ההזנה של שדה GRAIL (חלק C), וקוד הקורא את פני השטח מעל כל כיפה. כללי המדידה מפורטים להלן, כל אחד עם הסיבה שלו.

כלל	למה, במילים פשוטות
שטחו של ים: הליבה של כיפת ההזנה שלו	הכיפה היא המבנה שמתחת לפתח; הליבה שלה קובעת היכן נמצאים המרכז והשוליים
מרכז: 0.3–0 מהרדיוס; שוליים: 0.7–1.0	אמצע הכיפה לעומת קצה, כל אחד לפי הגובה החציוני
חוזק הכיפה: עודף הכבידה שלה	העודף של המרכז על פני הטבעת שסביבו, משדה הכבידה

טבלה: כללי המדידה של מחקר 5, וההסבר לכל אחד.

STEP איסוף הנתונים (ביצוע המחקר)

הימות והכיפות שלהם נקבעו לפני שהגבהים נקראו. לסדר הזה יש חשיבות: לא ניתן היה לבחור את השטחים, אפילו בלי משים, כך שיעדיפו מרכז שקוע. לכל ים נקראו הגובה החציוני של המרכז ושל השוליים ממדידת הגובה בלייזר, ונלקח ההפרש. החציון, הערך האמצעי, משמש במקום הממוצע כדי שמכתש בודד או פסגה בודדת בשטח לא יזיזו את התוצאה. הערכים הם הטבלה של E.2§ ואיור 4.

STEP 6 ניתוח הנתונים ועיבודם

המרכז לעומת השוליים. מתוך 12 הימות הפתוחים, ב-10 המרכז נמוך מהשוליים; ההפרש החציוני הוא 267 – מ'. אילו המרכז והשוליים היו בעלי סיכוי שווה להיות הגבוהים, המקרה היה נותן כמחצית, שישה מתוך שנים-עשר, עם מרכז נמוך; 10 ומעלה מתוך 12 היו קורים במקרה כ-2 פעמים מתוך 100 – נדיר כמו מטבע הוגן הנופל על אותו צד 10 פעמים ומעלה ב-12 הטלות. *החוזק לעומת הגובה*. מתאם הדרגות בין חוזק הכיפה לבין גובה המרכז הוא 0.59–: ככל שהכיפה חזקה יותר, המרכז נמוך יותר, בהסתברות מקרית של 4 מתוך 100. אילו לא היה קשר, המתאם הצפוי היה קרוב לאפס; ערך רחוק מאפס כמו 0.59– היה מתקבל במקרה רק ב-4 מתוך 100 מערכות של שנים-עשר ימות. *Orientalis*, מעל הכיפה החזקה ביותר (740 מיליגל), עומד נמוך ב-2.2 ק"מ במרכזו; *Moscoviense* (689) ב-1.1 ק"מ; *Nectaris* (538) ב-1.6 ק"מ. *היוצאים מן הכלל*. *Serenitatis* (+60 מ') ו-*Imbrium* (+43 מ'), שני הימות הגדולים של המגע. *הימות הקבורים*, המוצגים בנפרד, נמוכים במרכזם ב-15 מתוך 17, עם מתאם של 0.70–; שם פני השטח הם הכיסוי, וההפרש כולל גם את צורת הכיסוי עצמו.

STEP 7 הסקת מסקנות וכתובת הדוח

תוצאה. ההשערה נתמכת: מרכזו של ים שקע מעל הכיפה הצפופה העשירה בברזל שלו, ושקע יותר ככל שהכיפה חזקה יותר. **שני הימות של המגע.** *Imbrium* ו-*Serenitatis* קפאו קרוב לכדור הארץ. משיכת כדור הארץ משכה את הצד הקרוב החוצה; ים שקפא תחת המשיכה הזאת קפא כשמרכזו מוחזק למעלה, והמרכז לא שקע אחר כך. *Serenitatis*, שהתקלף ראשון (מאמר 3), קפא ראשון, קרוב מאוד לכדור הארץ, ונמשך החוצה יותר מכול (+60 מ'); *Imbrium* קפא אחרי הניתוק, כשהירח התרחק (+43 מ'). הימות הרחוקים יותר מהמגע קפאו כשהמשיכה הזאת כבר לא החזיקה אותם, ומרכזיהם שקעו מעל הכיפות שלהם. שני היוצאים מן הכלל אינם אפוא רעש במבחן: הם שני הימות שהמודל ממקם במקום שבו משיכת כדור הארץ הייתה החזקה ביותר, והם השניים שלא שקעו. **מגבלות.** המבחן נשען על 12 ימות פתוחים; הגובה במרכז נושא גם את הנחיתות המאוחרות יותר ואת צורת הקרקעית לפני שקפאה. שלושה גורמים יכולים להנמיך את המרכז – משקל הגוף הצפוף, יניקה, ולדעתנו בעיקר התפשטות והתכווצות בחום ובקור, החזקה יותר ככל שהמסה גדולה יותר בקוטר ובעומק – והמדידה אינה בוחרת ביניהם (E.38). **כיווני מחקר המשך.** השקיעה מחושבת עבור גוף מתקרר עשיר בברזל בצפיפות הנמדדת: גוף בעובי 20–30 ק"מ שהתקרר ב-300–450 קלווין מתכווץ די כדי להנמיך את המרכז בשיעור הנמדד.

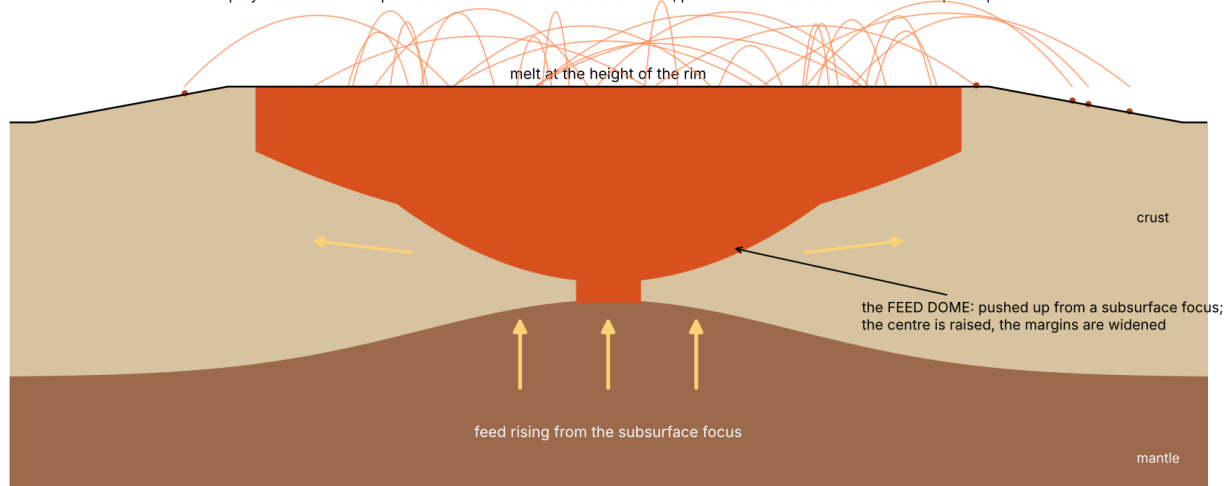
E.3 מדוע הקרקעית שוקעת

כיפת ההזנה קפאה לגוף צפוף עשיר בברזל ובטיטניום. המרכז עומד מעל החלק העמוק ביותר של הגוף הזה, ושקע יותר מכול. שלושה גורמים יכולים להנמיך את המרכז – משקל הגוף הצפוף, יניקה, ולדעתנו בעיקר התפשטות והתכווצות בחום ובקור, החזקה יותר ככל שהמסה גדולה יותר בקוטר ובעומק. משקל הגוף הצפוף לוחץ על מה שמתחתיו; היניקה מושכת את הקרקעית מטה כשההתך שמתחתיה נסוג; ומסה שהתפשטה בחום מתכווצת כשהיא מתקררת, ויותר ככל שהיא גדולה ועמוקה יותר. התמונה של האחרון היא סיר מרק סמיך שהושאר להתקרר: פני השטח מסתיימים נמוך ביותר במקום שבו המרק שמתחתיהם היה העמוק ביותר. שלושתם לבדיקה; המדידות אינן בוחרות ביניהם, וגם המאמר אינו בוחר. מה שהמדידות כן קובעות הוא הקשר: עומק השקיעה עוקב אחר חוזק הגוף הצפוף שמתחת לכל ים (E.28).

קורא המכיר את הספרות יציין שגם העומס של מסקון צפוי לכופף את הקרקעית מטה במרכז (E.28), מחקר 5, שלב 2). שתי הקריאות מסכימות על הצורה: מרכז שקוע מעל גוף צפוף, שוליים מתוחים ופנים לחוץ. הן נבדלות במה שהגוף הצפוף הוא: בספרות – מילוי בזלתי מעל מעטפת שהורמה על ידי אירוע חיצוני; במודל – כיפת ההזנה הקפואה עצמה, שדרכה הזון הפתח. צורת הקרקעית משותפת לשתיים; מה שהמודל מוסיף הוא הגוף שמתחת, וחלק D הראה את הגוף הזה גם מתחת ל-44 פתחים שאין עליהם בזלת כלל.

1. Active: the feed dome lifts the floor to the rim; spray builds the rim

spray rises all the time: part falls back into the melt and is remelted, part lands in the shelter of the rim and piles up

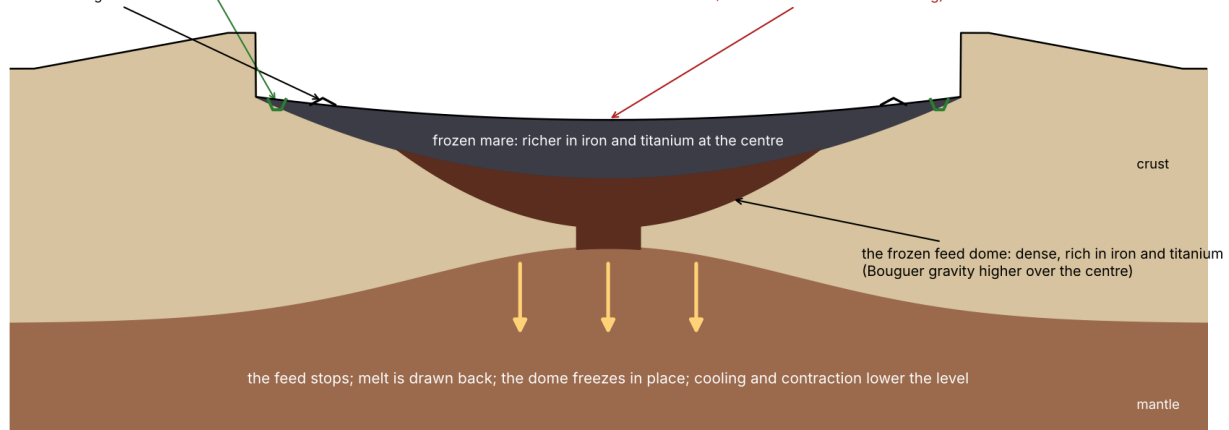


2. Frozen: the floor lowered, the centre sunk over the dense dome, the margin stretched

graben ~0.94 R, half concentric: the widened margin

wrinkle ridges ~0.81 R

centre sunk over the dense dome (~90 m where the dome is strong)



Schematic cross-section, not to scale; the sag of the floor is exaggerated about 100 times.

איור 5. ים וכיפת ההזנה שלו בשני שלבים: (1) פעיל — הכיפה, שנדחפה מעלה ממוקד תת-קרקעי, מרימה את המרכז ומרחיבה את השוליים; ההתך עומד בגובה השפה ורסס עולה כל עוד ההזנה פעילה; (2) קפוא — ההזנה נפסקת, הכיפה קופאת לגוף צפוף עשיר בברזל ובטיטניום, המרכז שוקע מעליה, השוליים נמתחים לגראבנים והפנים נלחץ לרכסים. סכמטי; השקיעה מוגזמת כפי מאה.

איור 5 הוא חתך דרך ים אחד, הנקרא מלמעלה למטה כרצף בזמן. בלוח העליון, השלב הפעיל, עקבו אחר החצים: ההזנה עולה מהמוקד התת-קרקעי, דוחפת את הכיפה מעלה ופורשת את השוליים לצדדים; ההתך עומד בגובה השפה, והרסס הנזרק ממנו נופל בחלקו בחזרה אל ההתך ובחלקו על השפה, ושם הוא נערם. בלוח התחתון, השלב הקפוא, החצים מצביעים מטה: ההזנה נפסקה, הכיפה קפאה לגוף הצפוף שהכבידה רואה היום, והקרקעית שמעליה שקעה, עמוק ביותר במרכז, עם גראבנים שנפתחו ליד השפה ורכסי קמטים שנלחצו פנימה יותר. השקיעה משורטטת עמוקה כפי מאה ממה שהיא באמת, כדי שאפשר יהיה לראות אותה בכלל.

מה שיש בידינו עכשיו: כל ים עומד מעל כיפת הזנה צפופה; הקרקעית של כל ים פתוח שקעה מעל הכיפה שלו, יותר ככל שהכיפה חזקה יותר; והשניים היחידים שלא שקעו הם שני הימות של המגע, שקפאו קרוב לכדור הארץ ותחת משיכתו — Serenitatis ראשון, Imbrium אחרי הניתוק.

חלק F — הרצפה, הרצפות והמפזר האחרון

הבעיה

אם ים קפא כמו אגם, הרצפה שלו חייבת להיות משטח אחד. **הגישה:** ב-646 היחידות נמדדו המפלסים, השפות והמכתשים הקטנים שעל הרצפות, והרצפות הושוו זו לזו.

חלק E ירד אל מתחת לים, אל כיפת ההזנה, ומצא שמרכזו של ים שקע מעל הכיפה הצפופה והעשירה בברזל שמתחתיו — במשקלה, ביניקה או, לדעתנו בעיקר, בהתכווצות תרמית, לבדיקה — מלבד Serenitatis ו-Imbrium, שני הימות של המגע, שמרכזם מוגבה מעט. חלק זה עולה חזרה אל פני השטח שהכיפה השאירה אחריה: הרצפה. הוא שואל שלוש שאלות, זו אחר זו. ראשית, מהי צורת הרצפה — משטח אחד או רבים, וכיצד היא עומדת מול השפה שלה, מול היבשה שסביבה ומול מישורי הבזלת שלצידה (F.1–F.4§§)? שנית, כמה מכתשים היא נושאת לעומת היבשה שסביבה (F.5§)? שלישית, איזה מקור יצר את המכתשים שהיא כן אספה, ומה הם מספרים על הסדר שבו קפאו הרצפות (F.6§)? החוט שמחבר את שלוש השאלות פשוט: פתח שעדיין פעיל ממיס או בולע כל מה שנוחת עליו, ולכן הרצפה שלו מתחילה לשמור רישום רק כשהיא קופאת. צורת הרצפה מספרת כיצד היא קפאה; המכתשים שעליה מספרים מתי.

שתי מילים משמשות לאורך כל החלק. הרצפה של ים היא הבזלת שנמצאת בתוך ליבת כיפת ההזנה שמתחתיו — פני השטח הקפואים של הפתח עצמו. ים קבור הוא פתח שנאטם ושפני השטח שלו כוסו מאוחר יותר בשכבות שבנו את הצד הרחוק, סיאל וחומר חוזר (חלק D); אין לו רצפה חשופה משלו. ים פתוח הוא ים שהרצפה שלו עדיין חשופה.

F.1 רצפה אחת

מדוע אגם קפוא הוא מפולס. נוזל במנוחה תחת כבידה אינו יכול להחזיק שיפוע: כל חלק שעומד גבוה יותר זורם מטה, עד שכל פני השטח נמצאים במפלס אחד, כמו פני אגם. אם הוא קופא כשהוא עדיין במנוחה, הוא שומר על אותו מפלס אחד. רצפה שבנויה במקום זאת מזרימות רבות, שהונחו בזמנים שונים וקפאו אחת אחת, הייתה מראה כמה מפלסים — טרסות או מדרגות במקום שבו זרימה אחת מסתיימת מול אחרת. מספר המפלסים על רצפה הוא אפוא מבחן ישיר לאופן היווצרותה. המודל מציע שכל רצפת ים היא החלק העליון של גוף אחד של התכה בפתח, שקפא במקומו; עליה להראות מפלס אחד. ומכיוון שהחומר שיצא מן הפתח בנה את הקרקע שסביבו (F.3§), והמרכז שקע לאחר מכן מעל הכיפה (חלק E; במשקלה, ביניקה או, בעיקר, בהתכווצות תרמית), המפלס הקפוא צריך להימצא מתחת לשפה ומתחת ליבשה שסביב, והחלק הנמוך ביותר שלו צריך להימצא פנימה מן הדופן ולא צמוד אליה.

כיצד נמדדו הרצפות. הרצפה של כל ים — הבזלת שבתוך ליבת כיפת ההזנה שמתחתיו — נקראה על מודל הגבהים הגלובלי עבור 16 הימות שהרצפה שלהם משתרעת על 5,000 קמ"ר ויותר: 12 הימות הפתוחים, Humboldtianum (חלקי), Apollo Ingenii ו-Schiller–Zucchi, שכירתו הקבורה, ברוחב 909 ק"מ, עדיין מחזיקה כ-11,000 קמ"ר של בזלת; לשאר הימות הקבורים אין רצפה שאפשר לקרוא. מודל הגבהים הוא SLDEM2015 [S7], המצרף את הגבהים שנמדדו במד-הגובה הלייזרי של Lunar Reconnaissance Orbiter (LOLA) — מכשיר שמודד את הזמן שלוקח לפעימת לייזר לרדת אל פני השטח ולחזור — עם התמונות הסטריאוסקופיות של מצלמת השטח היפנית של SELENE, ונותן מפת גבהים אחת של הירח כולו. בסקר זה הוא נקרא ברשת של כ-7.6 ק"מ (המגבלה של מחקר 6 להלן), שהיא עדינה די הצורך

לרצפות האלה: רצפה של 5,000 קמ"ר, הקטנה ביותר שהתקבלה, רוחבה כ-80 ק"מ, כעשרה תאים. קו המתאר של הבזלת נלקח ממפת הימות של [S1] LROC, וקו המתאר של הליבה מכיפות ההזנה של נספח A. בכל רצפה הוסרה ההטיה הכללית, והגבהים של כל התאים שלה נאספו להתפלגות אחת; רצפה בעלת מפלס אחד נותנת שיא אחד, ורצפה של כמה זרימות בכמה גבהים נותנת כמה שיאים. השפה, היבשה והמישור נקראו לאחר מכן, כל אחד, מאותה מפת גבהים, לפי הכללים המפורטים במחקר 6.

מה נמדד	תוצאה
מפלסים בתוך רצפה	מפלס אחד ב-16 מתוך 16; בסקר העדין יותר של כל היחידות הממופות, מפלס אחד ב-188 מתוך 189
הרצפה מול השפה שלה	מתחתיה ב-16 מתוך 16, בחציון של 3.4 ק"מ
הרצפה מול היבשה שסביבה	מתחתיה ב-16 מתוך 16, בחציון של 1.6 ק"מ
החלק הנמוך ביותר של הרצפה	בחציון של 0.57 מן הרדיוס; צמוד לדופן באף אחת

ארבע התשובות על צורת הרצפות של הימות הגדולים (F.1§).

הטבלה נותנת את ארבע התשובות, אחת בכל שורה. כל אחת מ-16 הרצפות הגדולות מראה מפלס יחיד, וכך גם 188 מתוך 189 היחידות הממופות הקטנות יותר בסקר העדין. כל רצפה נמצאת מתחת לשפה שלה ומתחת ליבשה שסביבה. החלק הנמוך ביותר שלה נמצא, בחציון, מעט יותר ממחצית הדרך מן המרכז אל קצה הליבה (0.57 מן הרדיוס, כאשר 0 הוא המרכז ו-1 הוא קצה הליבה) — ולעולם לא צמוד לדופן.

רצפת ים היא משטח אחד, שקפא במפלס אחד, כפי שאגם קופא. היא נמצאת הרבה מתחת לשפה שלה ומתחת ליבשה שסביבה, והחלק הנמוך ביותר שלה נמצא פנימה מן הדופן, במקום שבו המרכז שקע מעל הכיפה (מחקר 5).

שני עומקים, וכיצד המספרים של מאמר זה קשורים זה לזה. השפה היא רכס הקרקע שסביב הפתח — העשרים העליון של הגבהים בטבעת שבין 1.0 ל-1.5 רדיוסים; היבשה היא הקרקע שליד הפתח בכללותה, ללא בזלת, עד 300 ק"מ. אלה שתי נקודות ייחוס שונות, והרצפה עומדת מתחת לראשונה בחציון של 3.4 ק"מ ומתחת לשנייה בחציון של 1.6 ק"מ. העומק מתחת לשפה מופיע במאמר זה בשתי צורות: כחציון הנמדד, 3.4 ק"מ (כאן ובתקציר), וכ"כ-3 ק"מ, אותו חציון מעוגל (תיבת הפתיחה, A.1§ ו-O.1§); על פני 16 הרצפות הוא נע בין 0.9 ק"מ (Copernicus H) ל-6.2 ק"מ (Moscoviense), בממוצע של 3.3 ק"מ. (גרסה קודמת נתנה "כ-2 ק"מ ב-A.1§ ו-O.1§; שום עומק נמדד מתחת לשפה אינו קטן כל כך בחציון, ו-2 ק"מ קרוב יותר לעומק מתחת ליבשה, שממוצעו על פני 16 הרצפות הוא 2.0 ק"מ.) ה-1.6 ק"מ מתחת ליבשה הוא גודל נפרד, הנמדד מול נקודת ייחוס אחרת.

מדוע 16 מתוך 16 חשוב. אילו רצפה הייתה עשויה באותה מידה לעמוד מעל השפה שלה או מתחתיה, הסיכוי שכל 16 ייפלו מתחתיה במקרה הוא חצי כפול עצמו 16 פעמים: 1 ל-65,000 (מחקר 6). אותו הדבר נכון ליבשה. התוצאה היא אפוא לא סידור מקרי של כמה ימות אלא תכונה של כל רצפה גדולה.

ימות המגע רדודים. המגע הוא האזור של הירח שנגע אחרון בקצה האגס של כדור הארץ, 3,000 הק"מ האחרונים של הקצה (מאמר 3); הימות שלו הם Sinus Aestuum, Serenitatis, Imbrium, Copernicus H. הימות שמעבר למגע נמצאים מחוצה לו. מישור הוא בזלת מחוץ לכל ים: קרום רגיל שהותך במקומו בזמן שהגוף היה מחובר, ללא כיפת הזנה וללא תעלה אל העומק מתחתיו (C.2§). כשמעמידים אותו מול מישור הבזלת שלצידו, ים של המגע נמצא במפלס שלו או קרוב אליו, והאגנים הגדולים שמעבר למגע נמצאים עמוק מתחתיו. הטבלה נותנת כל ים שעבורו אפשר היה לקרוא מישור:

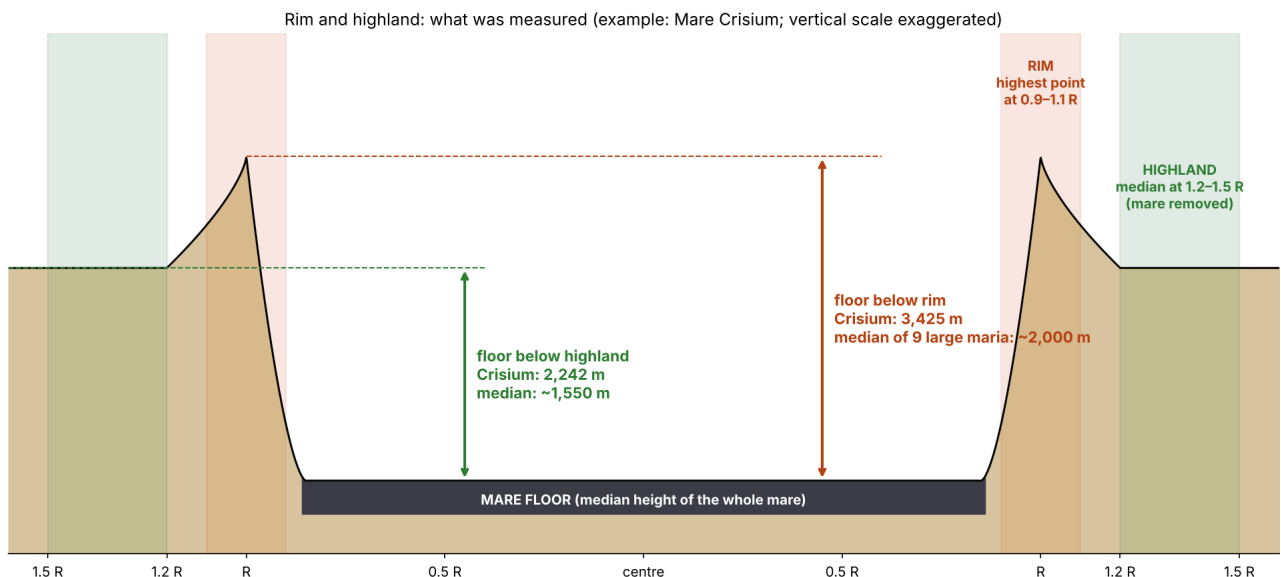
ים	הרצפה מול המישור שלצידה	המדרגה בקצה הכיפה
המגע		
Copernicus H	מ' +125	מ' 44
Sinus Aestuum	מ' +25	מ' 5
Imbrium	מ' -254	מ' 94
Serenitatis	מ' -842	מ' -100
מעבר למגע (הגבעה ומעבר לה)		
Ingenii	מ' +2,144	מ' -49
Crüger–Sirsalis	מ' +199	
Poincaré	מ' +119	מ' 43
Schiller–Zucchi	מ' +76	
Grimaldi	מ' -128	
Humorum	מ' -492	מ' -10
Apollo	מ' -523	מ' 6
Nectaris	מ' -1,058	מ' -627
Humboldtianum	מ' -1,285	
Crisium	מ' -1,352	מ' -134
Smythii	מ' -1,752	
Oriente	מ' -2,019	
Moscoviense	מ' -2,200*	
Mendel–Rydberg	לא ניתן למדידה	

המישור: בזלת מחוץ לכל ים, בטווח 300 ק"מ מקצה הכיפה. המדרגה: הרצפה בתחום 0.85–1.0 מן הרדיוס מול המישור בתחום 1.0–1.15, היכן ששתי הטבעות מחזיקות די פיקסלים. *Moscoviense: מתוך 21 פיקסלים בלבד של מישור. Mendel–Rydberg: פיקסל אחד של מישור. צבע: כחול היכן שהרצפה עומדת מעל המישור שלה, אדום היכן שהיא מתחתיו, עמוק יותר עם העומק.

לטבלה שני גושים, המגע למעלה והימות שמעבר לו למטה, וכל אחד מסודר מן הרצפה העומדת הכי גבוה אל הרצפה השוכנת הכי עמוק; הצבע עובר מכחול, רצפה מעל המישור שלה, לאדום מעמיק, רצפה מתחתיו. העמודה האמצעית נותנת את הרצפה מול המישור; סימן פלוס פירושו שהרצפה עומדת מעליו. העמודה האחרונה מתבוננת רק בקצה הכיפה: היא משווה את הרצפה ממש בתוך הקצה (0.85–1.0 מן הרדיוס) עם המישור ממש מחוצה לו (1.0–1.15), כך שדופן או ירידה בקצה היו מופיעות כמדרגה גדולה.

הרצפות של Copernicus H, Sinus Aestuum ו-Imbrium עומדות במפלס של המישורים שלצידן — בטווח של כמה עשרות עד כמה מאות מטרים — ושום מדרגה אינה מסמנת את קצה הכיפה: 5 עד 94 מ', מעט לעומת הקילומטרים של הימות שמעבר. במקום שבו רצפה ומישור נפגשים במפלס אחד ללא מדרגה, השניים היו נזליים יחד וקפאו יחד; זה מה שהמודל מצפה לו מן המגע, שבו הימות הזזו עד הסוף לצד מישורים שגם הם עצמם הותכו. מעבר למגע התמונה מתחלקת לפי גודל. מתוך 13 הימות שיש להם מישור מדיד, 9 נמצאים מתחתיו, בחציון של 0.52 – ק"מ. ששת האגנים הגדולים והעמוקים — Crisium, Humboldtianum, Nectaris —

Smythii, Moscoviense ו-Orientale, האחרון מתוך 21 פיקסלים בלבד של מישור — נמצאים קילומטר עד שניים מתחת למישורים שסביבם (1.0–2.2 ק"מ). Apollo ו-Humorum נמצאים כחצי קילומטר מתחת; Grimaldi, Poincaré, Schiller–Zucchi ו-Crüger–Sirsalis נמצאים בטווח 0.2 ק"מ מן המישור שלהם; Ingenii, מעל South Pole–Aitken, עומד 2.1 ק"מ מעליו. הטבלה הקודמת של סעיף זה הראתה רק את חמשת האגנים הגדולים, תחת המילים "ים שמעבר למגע נמצא עמוק מתחתיו" (גרסה קודמת); הסט המלא אומר שהעומק מתחת למישור שייך לאגנים הגדולים ולא לימות הקטנים. Serenitatis נמצא נמוך מן המישורים שלצידו: השוליים שלו אינם מישור אלא טבעת של נתזים מן הפצפוצים הקלים שלו בזמן הקילוף של המגע; הוא לא השליך חומר של ממש (F.3§).



איור 6. רצפת הימות הגדולים מול השפות שלהם ומול הרמות שסביבם (F.1§).

איור 6 מראה את אותה תוצאה עבור כל ים גדול בתורו: גובה הרצפה שלו לצד גובה השפה שלו וגובה הרמה שסביבו. בכל מקרה הרצפה היא הנמוכה מבין השלוש. מה שיש בידינו עכשיו: כל רצפה היא מפלס קפוא יחיד, הנמצא מתחת לשפה וליבשה שלו, ושקוע במרכזו, מלבד Serenitatis ו-Imbrium, שני הימות של המגע, שמרכזם מוגבה מעט (חלק E); במגע הוא עומד במפלס של המישורים המותכים שלצידו; מעבר למגע האגנים הגדולים נמצאים הרחק מתחתיהם, והימות הקטנים קרוב למפלסם.

F.2 שוליים מתוחים, פנים לחוץ

שני סוגים של תוואים חוצים את רצפות הימות. רכס קמטים הוא הגבהה נמוכה ומתפתלת, במקום שבו פני השטח נדחקו יחד והתקמטו; גראבן הוא שוקת ארוכה וצרה בין שני שברים מקבילים, במקום שבו פני השטח נמתחו לצדדים ורצועה שקעה מטה. מיקומם מספר היכן הרצפה נלחצה והיכן היא נמתחה. המיקומים ניתנים כשברים של רדיוס ליבת הכיפה: 0 במרכז, 1 בקצה הליבה, יותר מ-1 מחוצה לה.

ביחידות הממופות של הימות, רכסי הקמטים נמצאים ב-0.71–0.77 מן הרדיוס והגראבנים ב-0.76–1.22: השוליים נמתחו כשהמרכז שקע, והפנים נלחץ לרכסים. התמונה היא יריעת קרח על בריכה שהמים מתחת לאמצעה יורדים: כשהאמצע שוקע, הקרח נמתח ונפרד ליד החוף ונדחס לעבר המרכז. שום חפיר אינו עובר לאורך הדפנות: החלק הנמוך ביותר של כל רצפה נמצא פנימה מ-0.9 מן הרדיוס. חפיר — שוקת לאורך רגלי הדופן — היה פירושו שהרצפה שקעה יותר מכול בקצה שלה; הרצפה שקעה יותר מכול סמוך לאמצעה, מעל הכיפה.

המידות של F.1–F.2§§ הן מחקר אחד, המוצג להלן בשבעת השלבים שמשמשים בכל מחקר במאמר זה.

שלב 1 — הגדרת שאלת המחקר והבעיה. התופעה. רצפות הימות חלקות וכהות, תחומות בגראבנים ונחצות ברכסי קמטים. **הפער בידע.** האם רצפת ים היא משטח אחד במפלס אחד, כיצד היא עומדת מול השפה שלה, מול היבשה שסביבה ומול המישורים שלצידה, והיכן נמצאים החלק הנמוך ביותר שלה, הסדקים שלה והרכסים שלה — כל אלה לא נקראו יחד על הימות כפי שהם מוגדרים לפי כיפות ההזנה שלהם. **שאלת המחקר:** האם כל רצפת ים היא מפלס אחד; כיצד היא עומדת מול השפה שלה, מול היבשה שסביבה ומול המישורים שלצידה; והיכן נמצאים החלק הנמוך ביותר שלה, הגראבנים שלה והרכסים שלה?

שלב 2 — סקירת ספרות (רקע מדעי). הגראבנים בשוליים והרכסים בפנים מתפרשים כהתכופפות של הרצפה תחת עומס הבזלת שלה [S21]: משקל הבזלת מכופף את הרצפה מטה באמצע, כמו קרש שמתעקם תחת משא. הבזלת מתפרשת כזרימות רבות, בנות גילים שונים, שהונחו זו על זו [S15], והימות והמישורים של הצד הקרוב — כסוג אחד של פני שטח. **מה חדש כאן:** הרצפה היא הבזלת שמעל כיפת ההזנה, הנקראת מול השפה שלה, מול היבשה שלה ומול המישור שלצידה, וימות המגע מופרדים מן הימות שמעבר לו.

שלב 3 — ניסוח השערת המחקר. רצפת ים קפאה כמשטח אחד, כפי שאגם קופא, מתחת לשפה שלה; מרכזה שקע מעל הכיפה, ולכן החלק הנמוך ביותר שלה נמצא פנימה מן הדופן; השוליים נמתחו והפנים נלחץ. ימות המגע הוזנו עד הסוף לצד מישורים שגם הם עצמם הותכו, וקפאו במפלס שלהם; הימות שמעבר למגע נמצאים עמוק מתחת לקרקע שסביבם.

שלב 4 — מערך המחקר (מתודולוגיה). סוג המחקר: כמותי, מדידת גבהים ומיקומים על מפות. **המדגם:** 16 הימות של נספח A שהרצפה שלהם 5,000 קמ"ר ויותר; 189 היחידות הממופות של 1,000 קמ"ר ויותר לספירה העדינה יותר של המפלסים. **הכלים:** מפת הימות של [S1] LROC, מדידת הגובה בלייזר [S7], כיפות ההזנה של נספח A, וקוד שקורא מפלסים, גבהים ומיקומים בתוך כל רצפה. הטבלה שלהלן נותנת כל כלל של המדידה, ולצידו מה הוא נועד ללכוד.

כלל	למה, במילים פשוטות
הרצפה: בזלת בתוך ליבת הכיפה	פני השטח של הפתח עצמו
מפלסים: שיאים בהתפלגות גובה הרצפה לאחר הסרת ההטיה שלה	רצפה של כמה זרימות בכמה גבהים מראה כמה שיאים
השפה: העשרים העליון של הקרקע ב-1.0–1.5 רדיוסים	רכס הקרקע שסביב הפתח
היבשה: קרקע ללא בזלת בטווח 300 ק"מ מן הקצה	הקרקע שליד הפתח
המישור: בזלת מחוץ לכל ים בטווח 300 ק"מ מן הקצה	הקרום המותך שליד הפתח

כללי המדידה של מחקר 6.

שלב 5 — איסוף הנתונים (ביצוע המחקר). כל רצפה נקראה למספר המפלסים שלה, לגובה החציוני שלה, לגובה השפה שלה, היבשה שלה והמישור שלצידה, למדרגה בקצה הכיפה שלה, ולמיקום העשרים הנמוך ביותר שלה. הערכים הם הטבלאות של F.1§.

שלב 6 — ניתוח הנתונים ועיבודם. מפלס אחד. כל 16 הרצפות מראות מפלס אחד, וכך גם 188 מתוך 189 היחידות הממופות. **מתחת לשפה וליבשה.** כל 16 הרצפות נמצאות מתחת לשפה שלהן, בחציון של 3.4 ק"מ, ומתחת ליבשה שלהן, בחציון של 1.6 ק"מ; 16 מתוך 16 במקרה, אילו כל כיוון היה סביר באותה מידה, הוא 1 ל-65,000. **החלק הנמוך ביותר.** הוא נמצא בחציון של 0.57 מן הרדיוס, ובאף רצפה אינו מעבר ל-0.9 מול המישור. שלושה מארבעת ימות המגע נמצאים בטווח 254 מ' מן המישור שלצידם, עם מדרגות של 5–94 מ' בקצה הכיפה; Serenitatis נמצא 842 מ' מתחתיו. מעבר למגע 9 מתוך 13 הימות שיש להם מישור מדיד

נמצאים מתחתיו (חציון -0.52 – ק"מ): ששת האגנים הגדולים ב-1,058–2,200 מ', Apollo-I Humorum בכ-500 מ', ואילו Crüger–Sirsalis, Poincaré, Grimaldi, Schiller–Zucchiuss נמצאים בטווח 0.2 ק"מ מן המישור שלהם ו-Ingenii עומד 2,144 מ' מעליו. גראבנים ורכסים. הרכסים נמצאים ב-0.71–0.77 מן הרדיוס, הגראבנים ב-0.76–1.22.

שלב 7 — הסקת מסקנות וכתובת הדוח. תוצאה. ההשערה נתמכת: רצפת ים היא משטח אחד שקפא מתחת לשפה וליבשה שלו, מרכזו שקע, שוליו נמתחו ופנימו נלחץ; ימות המגע קפאו במפלס של המישורים שלצידם, ומעבר למגע האגנים הגדולים נמצאים עמוק מתחת למישורים שלהם. החלק של ההשערה המדבר על כל הימות שמעבר למגע מתקיים באגנים הגדולים ולא בימות הקטנים, הנמצאים בטווח של כחצי קילומטר מן המישורים שלהם, ו-Ingenii מעל המישור שלו. **מגבלות.** מודל הגבהים ששימש ל-34 הימות מבחין בפרטים של כ-7.6 ק"מ, ורצפה בעלת מפלס אחד אינה שוללת כשלעצמה זרימות דקות רבות באותו מפלס; המישורים שלצד כמה מן הימות הרחוקים הם פיקסלים מעטים; המיקומים של הגראבנים והרכסים נקראים על היחידות הממופות, לא על ליבות הכיפות. **כיווני מחקר נוספים.** השכבתיות של הבזלת מגישוש מכ"ם, כמבחן בין משטח אחד לזרימות רבות; קצה הכיפה לאורך רצפות המגע, במעקב ברזולוציה מלאה.

F.3 השוליים: שכבות של מכתשים

F.1§ השאיר שאלה אחת פתוחה: מדוע הקרקע שסביב ים רחוק עומדת כה גבוה מעל הרצפה שלו? בספרות, הקרקע הגבוהה שסביב אגן היא השפה שלו, שהורמה על ידי האירוע שחפר אותו. המודל קורא אותה אחרת, כקרקע שנבנתה מבחוץ ממה שהים עצמו השליך החוצה.

כל ים גלש החוצה, בזמן זה או אחר, אך לא כלבה מעל השפה שלו: הבזלת מגיעה ל-0%–7% מן הטבעת שסביב הימות הרחוקים (1% Moscoviense, 1% Orientale, 3% Smythii, 7% Nectaris). אילו התכה הייתה נשפכת מעל השפה, הקרקע שמסביב הייתה בזלת; כמעט אין בה. מה שגלש החוצה היה החומר שיצא מן הים ונחת סביבו. ליד הים הוא היה חם ובעל צמיגות נמוכה — צמיגות היא ההתנגדות של נוזל לזרימה: דבש צמיג יותר ממים, והתכה חמה זורמת בקלות רבה יותר מהתכה קרירה. נחיתה נמרחה ולא שמרה על צורת מכתש, אבל השאירה את השכבה שלה, כמו כף של דייסה חמה שנופלת על צלחת ומתפשטת במקום להחזיק מכתש. שכבה על שכבה, החומר החוזר של הים בנה את השוליים שלו, והקרקע שסביב ים רחוק עומדת גבוה. מכתש בונה את השפה שלו אחרת: האנרגיה שבמרכזו דוחפת חומר החוצה, והדחיפה עורמת את השפה. ימות המגע הזונו עד הסוף ולא גלשו; הם נמצאים במפלס של המישורים שלהם (F.1§). Serenitatis, אף שהוא במגע, נמצא מתחת לקרקע שלצידו; הוא לא השליך חומר של ממש, וסביבו טבעת של נתזים מן הפצפוצים הקלים שלו בזמן הקילוף.

אם זה נכון, הקרקע שסביב ים רחוק צריכה לעלות ככל שמתרחקים מקצה הכיפה, להגיע לרכס במקום שבו השכבות היו העבות ביותר, ולרדת מעבר לו — צווארון מוגבה. סביב ימות המגע, שלא בנו שכבות כאלה, לא צריך להיות צווארון. הטבלה מודדת בדיוק את זה.

קרקע ללא בזלת, מעבר לקצה הכיפה	150–0 ק"מ	300–150	600–300	900–600	צווארון
ימות רחוקים, קבורים (17)	1,216	1,809	335	68	+742
ימות רחוקים, פתוחים (10)	-614	-379	-353	-586	+207
ימות המגע (4)	-1,110	-1,047	-985	-878	-137

גבהים חציוניים, במטרים. צווארון: הקרקע ב-150–300 ק"מ פחות הקרקע ב-300–600 ק"מ. הביקורת: נקודות במרחק 450 ק"מ ויותר מקצה כל כיפה ו-300 ק"מ ויותר מכל בזלת, שניתן להן רדיוס הליבה החציוני, 150 ק"מ.

כל שורה היא קבוצה של ימות, כל עמודה היא טבעת של קרקע במרחק נתון מעבר לקצה הכיפה, לאחר הסרת הבזלת; המספרים הם גבהים חציוניים. העמודה האחרונה, הצווארון, היא הגובה של הטבעת השנייה מעל השלישית: צווארון חיובי פירושו שהקרקע מוגבהת ליד הים ויורדת מעבר לו. הוא מחושב ים אחר ים ונמסר החציון, ולכן אין הכרח שיהיה שווה להפרש בין החציונים של שתי העמודות. השורות האדומות הן הימות הרחוקים, והאדום העמוק יותר — הקבורים שבהם; השורה הכחולה — ימות המגע; השורה האחרונה היא ביקורת שנלקחה מקרקע הרחוקה מכל ים ונקראה באותו אופן, והיא מראה מה ניתן קטע רגיל של הירח במקרה.

סביב הימות הרחוקים הקרקע עולה מקצה הכיפה אל רכס ב-150–300 ק"מ ויורדת מעבר לו: בחציון של 742 מ' סביב הימות הקבורים ו-207 מ' סביב הפתוחים. מול הביקורת, שנותנת 122 מ', הימות הקבורים עומדים גבוה יותר בבירור; הימות הרחוקים הפתוחים אינם נבדלים ממנה (מחקר 16). הימות הקבורים מראים זאת בבירור הרב ביותר, משום שבזלת מאוחרת לא כיסתה את הצווארון שלהם. סביב ימות המגע לא עומד צווארון כזה; הקרקע יורדת לעבר הים לאורך כל הדרך.

16 STUDY מחקר 16

שלב 1 — הגדרת שאלת המחקר והבעיה. התופעה. הימות הרחוקים נמצאים עמוק מתחת לקרקע שסביבם, בעוד ימות המגע נמצאים במפלס של המישורים שלהם (F.18). **הפער בידע.** האם הקרקע שסביב ים רחוק מוגבהת — בנויה ממה שיצא מן הים — או שהים פשוט שקוע בתוך קרקע בגובה רגיל, לא נמדד מול קרקע הרחוקה מכל ים. **שאלת המחקר:** כמה גבוהה הקרקע שסביב ים רחוק, בכל מרחק ממנו, מול הקרקע של אותו ירח הרחוקה מכל ים, ומול הקרקע שסביב ימות המגע?

שלב 2 — סקירת ספרות (רקע מדעי). בספרות, הקרקע שסביב אגן היא חומר ההשלכה (ejecta) והטבעות שלו, שהושלכו החוצה על ידי הגוף הפוגע החיצוני ונערמו בעובי הרב ביותר בשפה, ומתדלדלים כלפי חוץ; השפה של המכתש עצמו מורמת ומתהפכת על ידי הדחיפה כלפי חוץ [S10]. **מה חדש כאן:** השוליים של ים נקראים כשכבות של החומר החוזר של הים עצמו, שנמרח בנחיתה משום שהיה חם, וגובה הקרקע נקרא טבעת אחר טבעת סביב כל ים, עם ביקורת הרחוקה מכל ים.

שלב 3 — ניסוח השערת המחקר. החומר שיצא מים רחוק נחת סביבו חם, בצמיגות נמוכה; כל נחיתה נמרחת והשאירה שכבה ולא צורת מכתש, והשכבות בנו צווארון של קרקע מוגבהת סביב הים. ימות המגע הוזנו עד הסוף ולא בנו צווארון כזה. מכאן: סביב הימות הרחוקים הקרקע עומדת גבוה יותר ליד הים מאשר רחוק יותר ממנו, יותר מאשר סביב נקודות הרחוקות מכל ים; סביב ימות המגע — לא.

שלב 4 — מערך המחקר (מתודולוגיה). **סוג המחקר:** כמותי; גבהים לפי טבעות, עם קבוצת ביקורת. **המדגם:** 31 הימות של נספח A שיש להם כיפת הזנה; **הביקורת:** 170 נקודות ברשת של 4°, במרחק 450 ק"מ ויותר מקצה כל כיפה ו-300 ק"מ ויותר מכל בזלת. **הכלים:** מדידת הגובה בלייזר [S7], מפת הימות של [S1] LROC, כיפות ההזנה של נספח A, וקוד שקורא את הגובה החציוני של הקרקע ללא בזלת בטבעות שמעבר לקצה הכיפה. הביקורת עונה על ההתנגדות המתבקשת — שהקרקע של הירח עולה ויורדת בכל מקום, כך ש"צווארון" יכול להופיע סביב כל נקודה — בכך שהיא מודדת כמה גדול הצווארון שמראה קרקע רגילה.

שלב 5 — איסוף הנתונים (ביצוע המחקר). לכל ים נקראה הקרקע ללא בזלת בארבע טבעות שמעבר לקצה הכיפה שלו: 0–150, 150–300, 300–600 ו-600–900 ק"מ. לנקודות הביקורת ניתן רדיוס הליבה החציוני, 150

ק"מ, והן נקראו באותן טבעות. הטבעת הראשונה מכילה את מדרון השפה היורד אל תוך האגן; הצווארון הוא הטבעת השנייה מול השלישית. הערכים הם הטבלה של F.3§.

שלב 6 — ניתוח הנתונים ועיבודם. הימות הרחוקים. הצווארון עומד בחציון של 471 מ' מעל הקרקע שמעבר לו, והוא חיובי סביב 20 מתוך 27; מול הביקורת, בחציון של 122 מ', ההבדל מובהק (מבחן Mann–Whitney), (הסתברות 0.009). מבחן Mann–Whitney מדרג את כל הערכים של שתי הקבוצות יחד ושואל אם קבוצה אחת יושבת בדירוג גבוה יותר ממה שהמקרה היה מאפשר; הסתברות של 0.009 פירושה שהבדל גדול כזה היה נוצר במקרה פחות מפעם אחת במאה ניסיונות. סביב הימות הקבורים הוא עומד בגובה 742 מ', חיובי סביב 14 מתוך 17 (הסתברות 0.001 מול הביקורת); סביב הימות הרחוקים הפתוחים — 207 מ', חיובי סביב 6 מתוך 10, ואינו נבדל מן הביקורת. ימות המגע. אין צווארון: הקרקע ב-150–300 ק"מ עומדת 137 מ' מתחת לקרקע שמעבר לה, סביב כל הארבעה.

שלב 7 — הסקת מסקנות וכתובת הדוח. תוצאה. ההשערה נתמכת: הקרקע שסביב הימות הרחוקים מוגבהת בצווארון, בבירור הרב ביותר סביב הימות הקבורים, שאת הצווארון שלהם לא כיסתה בזלת מאוחרת; לימות המגע אין צווארון. מגבלות. מודל הגבהים מבחין בפרטים של כ-7.6 ק"מ; הימות הרחוקים הפתוחים מעטים, והצווארון שלהם אינו נבדל מן הביקורת; טבעת הצווארון נקבעה ב-150–300 ק"מ לפי צורת הפרופילים, כשמדרון השפה ממלא את הטבעת הראשונה; הצד הרחוק עומד גבוה באופן כללי, והביקורת, שנלקחה מאותו ירח, מסירה זאת רק בחלקו. כיווני מחקר נוספים. השכבות עצמן: צורות מכתש מרוחות ומרובצים מוערמים בצווארון, בתמונות ובמכ"ם, מול השפות של מכתשים גדולים באותו גודל.

F.4 הרצפות לפי אזור

הרצפות נבדלות בגובהן לא רק מים לים אלא גם לפי מקומן על הירח. הטבלה נותנת את גובה הרצפה האופייני בארבעה אזורים, הנקראים לפי קו האורך שבמרכזם: 90° מערב הוא מרכז החצי המוביל (לפי המוסכמה המקובלת, החצי הפונה לכיוון תנועת הירח במסלולו), 90° מזרח הוא מרכז החצי הנגרר, 0° הוא אמצע הצד הקרוב ו- 180° הוא אמצע הצד הרחוק.

אזור	90° מערב	0°	90° מזרח	180°
גובה הרצפה	ק"מ -1.5	ק"מ -1.8	ק"מ -1.8	ק"מ -5 (South Pole–Aitken)

גובה הרצפה האופייני בארבעה אזורים של הירח (F.4§).

קראו את השורה משמאל לימין: הרצפות מעמיקות מן החצי המוביל אל החצי הנגרר. הערך של הצד הרחוק הוא הרצפה של South Pole–Aitken, העמוקה ביותר על הירח, נושא מאמר 8. רצפות החצי המוביל עומדות הגבוה ביותר. הן קפאו מוקדם: בחצי המוביל, סיבוב הגוף המחובר הוביל את פני השטח אל הקור ראשונים.

F.5 מכתשים על הרצפות

עד כאן נקראו הרצפות לפי צורתן. מכאן והלאה הן נקראות לפי המכתשים שעליהן, שמספרים מתי קפאה כל רצפה.

הרצפות נקיות. ל"נקייה" יש כאן משמעות מדויקת: רצפה נושאת פחות מכתשים ליחידת שטח מאשר היבשה שסביבה, בכל גודל מכתש שנמדד. הסיבה לצפות לכך היא לב התמונה של מאמר זה. ים פתוח ממיס או מחזיק את מה שנחת עליו ואינו שומר מכתשים על עצמו — כמו סיר מרק רותח שאינו שומר סימן של מה שנזרק לתוכו; רצפה אוספת מכתשים רק לאחר שקפאה. היבשה שמסביב, לעומת זאת, שמרה כל מכתש שנוצר עליה מן הזמן שבו הונחה. אם הרצפות קפאו לאחר שרוב החומר החוזר כבר נחת, הן חייבות להיות נקיות בהרבה מן היבשה שלהן; אילו קפאו מוקדם, היו מנוקדות במכתשים באותה מידה.

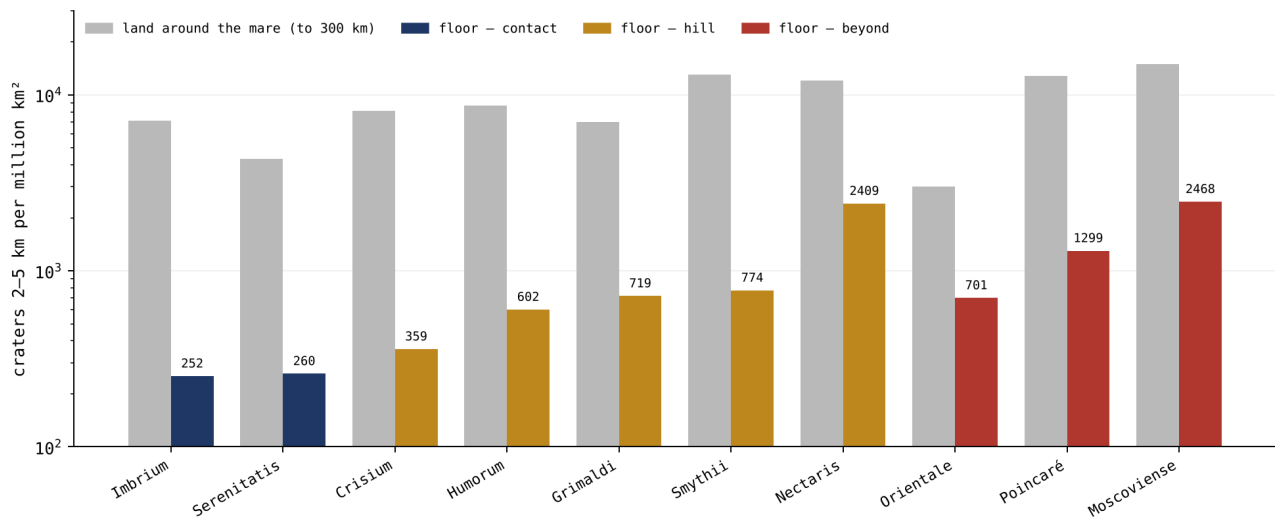
הרצפה של כל ים פתוח — הבזלת שבתוך ליבת כיפת ההזנה שמתחתיו — הושוותה ליבשה שסביבה, עד 300 ק"מ מעבר לליבה, לאחר הסרת הבזלת מן היבשה. כל ים מושווה כך רק לסביבתו שלו: הוא הביקורת של עצמו, ולכן הבדלים בין אזורים של הירח (הצד הרחוק, למשל, נושא יותר מכתשים באופן כללי) מתבטלים. שדות הקרניים של 16 מכתשים צעירים הוסרו משני הצדדים, כל אחד עד חמישה קטרי מכתש ממרכזו, כדי שהקרקע הבהירה של מכתש צעיר לא תיספר באף צד. הספרות קוראת את הקרניים של מכתש צעיר כמו Copernicus כפסים בהירים של פסולת שהושלכה הרחק על פני השטח, עם מכתשים משניים קטנים רבים; במודל קרן היא רישום בתוך הקרקע שמתחת לפני השטח, שנוצר רק במקום שבו חומר נחת על קרקעית שכבר התקררה (עבודה נוספת, סעיף 7). כך או כך, שדות הקרניים הם תווים בהירים שיש בהם מכתשים קטנים רבים משלהם; ספירתם בצד אחד ולא בשני הייתה הופכת את ההשוואה ללא הוגנת, ולכן הם מוסרים משני הצדדים באותה מידה. לעשרה מן הימות הפתוחים יש רצפה של 5,000 קמ"ר ויותר מחוץ לשדות הקרניים; Copernicus H ו-Sinus Aestuum נמצאים כולם בתוך הקרניים של Copernicus.

ים	אזור	רצפה (קמ"ר)	2-1 ק"מ	5-2 ק"מ	10-5 ק"מ	רצפה/יבשה, 5-2
Imbrium	המגע	345,584	5,359 / 29,235	252 / 7,142	46 / 1,217	0.04
Serenitatis	המגע	280,553	5,999 / 23,421	260 / 4,315	39 / 322	0.06
Crisium	הגבעה	144,849	6,704 / 21,899	359 / 8,125	62 / 1,202	0.04
Humorum	הגבעה	84,705	4,569 / 25,790	602 / 8,680	106 / 1,058	0.07
Nectaris	הגבעה	71,817	18,408 / 29,508	2,409 / 12,085	111 / 1,404	0.20
Smythii	הגבעה	41,365	4,883 / 30,275	774 / 13,034	435 / 1,354	0.06
Grimaldi	הגבעה	16,693	3,894 / 23,850	719 / 7,019	120 / 1,058	0.10
Oriente	מעבר	44,252	12,361 / 20,888	701 / 3,007	90 / 247	0.23
Moscoviense	מעבר	23,092	7,405 / 34,399	2,468 / 14,974	650 / 2,431	0.16
Poincaré	מעבר	15,397	6,624 / 20,579	1,299 / 12,798	779 / 2,323	0.10

מכתשים למיליון קמ"ר, רצפה / יבשה.

כל שורה היא ים אחד, צבועה לפי האזור שלו: כחול למגע, ענבר לגבעה (בסיס הבליטה, ברוחב 6,000 ק"מ, מאמר 3), אדום לימות שמעבר. כל עמודת גודל נותנת שני מספרים, הצפיפות על הרצפה והצפיפות על היבשה שסביבה, שתיהן במכתשים למיליון קמ"ר. העמודה האחרונה מחלקת את הראשון מביניהם בשני עבור המכתשים של 5-2 ק"מ: 0.04 פירושו שהרצפה נושאת 4% מן המכתשים שהיבשה שלה נושאת. הביטוי לאורך העמודה הזו: כל ערך נמוך בהרבה מ-1.

כל רצפה נקייה מן היבשה שלה בכל גודל: מן המכתשים של 5-2 ק"מ רצפה נושאת 4%-23% מן הצפיפות של היבשה שלה, חלק שנים-עשר בחציון; של 10-5 ק"מ — 4%-36%, תשיעית; של 2-1 ק"מ — 16%-62%, רבע. ימות המגע הם הרצפות הנקיות מכולן, Imbrium ו-Serenitatis עם כ-250 מכתשים של 5-2 ק"מ למיליון קמ"ר. אילו רצפות אספו יותר, ומדוע, נקרא ב-F.6§.



איור 7. מכתשים של 2–5 ק"מ על הרצפה של כל ים פתוח (צבועה לפי אזור: המגע כחול כהה, הגבעה ענבר, מעבר אדום) מול היבשה שסביבה (אפור), למיליון קמ"ר, לאחר הסרת שדות הקרניים של מכתשים צעירים משני הצדדים; סקאלה לוגריתמית (F.5S).

איור 7 משרטט את עמודת ה-2–5 ק"מ של הטבלה כזוגות של עמודות, הרצפה של כל ים לצד היבשה שלו. הסקאלה לוגריתמית — כל צעד במעלה הציר גדול פי עשרה מזה שמתחתיו — משום שהרצפות והיבשה נבדלות ביותר מפי עשרה; בסקאלה רגילה עמודות הרצפה כמעט לא היו נראות. בכל זוג, העמודה הצבעונית עומדת הרבה מתחת לאפורה, ועמודות המגע הכחולות-כהות הן הנמוכות מכולן.

STUDY 7 מחקר 7

שלב 1 — הגדרת שאלת המחקר והבעיה. התופעה. רצפות הימות נראות חלקות לצד היבשה שסביבן. **הפער בידע.** ים פתוח ממס את מה שנוחת עליו ואינו שומר מכתשים על עצמו, ולכן רצפה אוספת מכתשים רק לאחר שקפאה; כמה מעט מכתשים נושאות הרצפות לעומת סביבתן שלהן, ים אחר ים, לא נמדד במבחן אחד. **שאלת המחקר:** כמה מכתשים נושאת הרצפה של כל ים פתוח, לעומת היבשה שמסביבה מיד?

שלב 2 — סקירת ספרות (רקע מדעי). המכתשים הקטנים על הימות מתפרשים כמכתשים שנוצרו על כל משטח מאז הזרימה האחרונה שלו, וצפיפותם משמשת לתיארוך הזרימה [S15]; הרמות, העתיקות יותר, נושאות יותר. **מה חדש כאן:** כל רצפה מושווית לטבעת היבשה שסביבה, כך שכל ים הוא הביקורת של עצמו, והרצפה היא המשטח שמעל כיפת ההזנה, לא הבזלת כולה. שתי הקריאות מסכימות שרצפה נקייה התחילה לשמור מכתשים מאוחר; הן נבדלות במה שקבע את ההתחלה הזו — בספרות, זרימת הלבה האחרונה; במודל, קפיאת הפתח לאחר שהחומר החוזר נחת.

שלב 3 — ניסוח השערת המחקר. הרצפות קפאו לאחר שרוב החומר החוזר נחת; לכן כל רצפה נקייה בהרבה מן היבשה שלה, בכל גודל.

שלב 4 — מערך המחקר (מתודולוגיה). סוג המחקר: כמותי; השוואת צפיפויות, רצפה מול יבשה. **המדגם:** הימות הפתוחים של נספח A שיש להם רצפה של 5,000 קמ"ר ויותר מחוץ לשדות הקרניים, עשרה ימות; מכתשים של 2–5, 1–2, 5–10 ק"מ על כל רצפה ועל היבשה שסביבה. **הכלים:** הקטלוג של Wang & Wu [S6], מפת הימות של LROC [S1], כיפות ההזנה משדה GRAIL [S2], וקוד שסופר מכתשים ליחידת שטח. הכללים שלהלן שומרים על השוואה של שווה מול שווה: אותו קטלוג, אותם גדלים ואותה הסרת קרניים בשני הצדדים.

כלל	למה, במילים פשוטות
הרצפה: בזלת בתוך ליבת כיפת ההזנה	פני השטח של הפתח עצמו

היבשה: ללא בזלת, מן הליבה ועד 300 ק"מ מעבר לה	הקרקע שעליה נפל אותו חומר חוזר
קרניים של 16 מכתשים צעירים הוסרו, עד חמישה קטרים, בשני הצדדים	שדה הקרניים של מכתש צעיר אינו חלק מאף אחד משני הרישומים

כללי ההשוואה של מחקר 7.

שלב 5 — איסוף הנתונים (ביצוע המחקר). לכל ים שויכו המכתשים לפי מרכזיהם לרצפה או ליבשה, ונספרו למיליון קמ"ר של השטח שנותר לאחר הסרת שדות הקרניים. הספירות הן הטבלה של F.5§.

שלב 6 — ניתוח הנתונים ועיבודם. בכל עשרת הימות הרצפה נקייה מן היבשה שלה בכל גודל: הרצפה נושאת בחציון 8% מן הצפיפות של היבשה שלה ב-2–5 ק"מ (4–23%), 12% ב-5–10 ק"מ (4–36%) ו-24% ב-1–2 ק"מ (16–62%). הרצפות הנקיות ביותר הן Imbrium (252 מכתשים של 2–5 ק"מ למיליון קמ"ר) ו-Serenitatis (260), ימות המגע; הפחות נקיות הן Moscoviense (2,468) ו-Nectaris (2,409).

שלב 7 — הסקת מסקנות וכתובת הדוח. תוצאה. ההשערה נתמכת: כל רצפה נקייה בהרבה מן היבשה שלה, בכל גודל; הרצפות קפאו לאחר שרוב החומר החוזר נחת. **מגבלות.** מכתש בקצה רצפה משויך לפי מרכזו; המכתשים הקטנים ביותר מתערבבים עם מכתשים משניים; רשימת המכתשים הצעירים בעלי הקרניים שהוסרו אינה שלמה; שני ימות של המגע לא ניתן היה למדוד, משום שהרצפות שלהם נמצאות בתוך הקרניים של Copernicus. **כיווני מחקר נוספים.** הסדר שבו קפאו הרצפות, כפי שהוא נקרא מן המכתשים שהן כן אספו, הוא מחקר 12.

F.6 סדר הקפיאה, והמפזר האחרון

F.5§ הראה שכל רצפה נקייה; סעיף זה שואל מדוע חלקן נקיות יותר מאחרות, ומי יצר את המכתשים המעטים שהן כן נושאות. **המפזר האחרון** הוא המקור האחרון שהשליך את הריסיסים שיצרו את המכתשים הנמצאים כעת על משטח. חשוב לדעת אותו, משום שאפשר לקרוא את דפוס המכתשים על הרצפות כשעון רק אם המקור שיצר אותם לא העדיף ים אחד על פני אחר.

הרצפות נקיות, אבל לא באותה מידה. המכתשים שהן נושאות נוצרו לאחר שכל רצפה קפאה, והמפזר האחרון שיצר אותם היה כדור הארץ; לאחר השחרור הוא המשיך להשליך חומר, וחלק ממנו הגיע אל הירח מכל הצדדים (חלק G; מאמר 6, מחקר 9). הרצף הוא זה. בשחרור, הירח עזב את כדור הארץ כשהוא כבר עגול, והמעטפת החיצונית שלו קשיחה; הפחיסות וההתעגלות שלו התרחשו בעוד הוא מחובר (מאמר 7). האגס שעליו ישב לא נלקח עמו: המיון אסף אותו לאט חזרה אל כדור הארץ במשך עשרות עד מאות מיליוני שנים, ובחזרתו השאיר קמטים בפני השטח של כדור הארץ, הפסים של מאמר 9. בשחרור הלחץ מכדור הארץ הפסיק להגיע אל הירח, ואיתו פסקו הפליטות מכל הפתחים של הירח; רוב פתחי הצד הרחוק נאטמו זמן רב קודם לכן, כשהאגס גדל. ימות הצד הקרוב, חמים ובעלי צמיגות נמוכה, קפאו אז לאט, מבחוץ פנימה. הפתחים של כדור הארץ עצמו, לעומת זאת, לא פסקו. הם המשיכו להשליך חומר — רסיסים גדולים תחילה, כשהירח היה קרוב, ורסיסים קטנים מאוחר יותר, ככל שהתרחק, כולם חמים (G.4–G.5§§). כדור הארץ היה אפוא המפזר האחרון, ובעיקר של המכתשים הקטנים על הרצפות הקפואות.

זו הסיבה שהמקור חשוב לקריאה. חומר שהושלך מים של הירח נוחת בעובי הרב ביותר ליד אותו ים, ולכן היה משאיר יותר מכתשים על הרצפות הקרובות אליו מאשר על הרצפות הרחוקות — מפל לעבר ים אחד. לחומר מכדור הארץ, המגיע מכל הצדדים, אין מועדף כזה על הירח. אין אז לצפות למפל לעבר ים אחד. כל רצפה אספה מכתשים מן הרגע שבו קפאה, ומספר המכתשים מסדר את הרצפות לפי הזמן שבו קפאו — כמו שלג שיורד באופן אחיד על סדרה של שולחנות שהוצבו בחוץ זה אחר זה, ומשאיר את השכבה העמוקה ביותר על השולחן שהוצב ראשון. ימות המגע, שקפאו אחרונים, הם הנקיים ביותר. הם קפאו אחרונים משום שהם הוזנו אחרונים:

המגע היה האזור האחרון של הירח שהרפה מכדור הארץ, Serenitatis, שהתקלף ראשון, קפא ראשון, קרוב מאוד לכדור הארץ, ו-Imbrium, שנותק אחרון, קפא אחרי הניתוק, כשהירח התרחק (חלק E). הרסיסים הקטנים ביותר, של 2–1 ק"מ, קלים ומרחפים למרחק: הם פוזרו לכל הצדדים, והימות שעדיין היו פעילים פיזרו רסיסים קטנים משלהם על שכניהם, כך שהפיזור שלהם על פני הרצפות רחב והסדר שלהם לפי אזור חלש.

רצפות הימות הפתוחים	המגע	הגבעה	מעבר	הגבעה מול המגע	מעבר מול המגע
שטח, קמ"ר	626,137	359,429	82,742		
2–1 ק"מ	5,646	8,194	9,910	פי 1.5 (2.0–1.0)	פי 1.8 (2.4–1.2)
5–2 ק"מ	256	890	1,305	פי 3.5 (5.4–2.2)	פי 5.1 (8.4–2.6)
10–5 ק"מ	43	128	375	פי 3.0 (5.2–1.7)	פי 8.7 (17–3.5)
20–10 ק"מ	3.2 (2)	53 (19)	230 (19)	פי 17	פי 72
40–20 ק"מ	0 (0)	39 (14)	0 (0)	—	—
40 ק"מ ויותר	0 (0)	14 (5)	36 (3)	—	—
10 ק"מ ויותר, יחד	3.2 (2)	106 (38)	266 (22) פי 33 (לפחות 11.6)	פי 83 (לפחות 25)	

מכתשים למיליון קמ"ר; בסוגריים, מספר המכתשים כאשר הוא קטן; טווחים של 95% בדגימה חוזרת של תאים בגודל 5° על 5°. הקטלוג מונה כל אגן גדול כמכתש בפני עצמו; הרשומות האלה, של 300 ק"מ ויותר, שחמש מהן מרכזן על הרצפות (Serenitatis, Poincaré-Grimaldi, Humor, Nectaris), הן הימות עצמם, והן הושטו. גרסה קודמת מנתה אותן, ונתנה 1.6 (1), 22 (8) ו-48 (4) ב-40 ק"מ ויותר, ו-4.8 (3), 114 (41) ו-278 (23), פי 24 ופי 58 ב-10 ק"מ ויותר.

הטבלה מאחדת את הרצפות של כל אזור: כל רצפות המגע יחד, כל רצפות הגבעה, כל אלה שמעבר, כל קבוצה עם השטח הכולל שלה בשורה הראשונה. כל שורה שאחריה היא גודל מכתש אחד, מן הקטן ביותר למעלה ועד הגדול ביותר; הכחול מעמיק ככל שהמכתשים גדלים. שלוש העמודות הראשונות נותנות את הצפיפות על הרצפות של כל אזור; עמודת המגע מודגשת, כנקייה ביותר. שתי העמודות האחרונות נותנות פי כמה יותר מכתשים ליחידת שטח נושאות רצפות הגבעה ורצפות המעבר מאשר רצפות המגע, ובסוגריים — הטווח שבתוכו נופל היחס ב-95 מתוך 100 דגימות חוזרות. לצורך הדגימה החוזרת, הרצפות נחתכות לתאים של 5° על 5°, התאים נבחרים מחדש באקראי פעמים רבות, והיחס מחושב מחדש בכל פעם; מכיוון שנבחרים תאים שלמים, מכתשים שמתקבצים יחד נשמרים יחד ואינם מצרים את הטווח באופן כוזב. קראו את עמודות היחס כלפי מטה: מ-2 ק"מ ומעלה היחסים גדלים עם גודל המכתש, ועבור המכתשים של 10 ק"מ ויותר, יחד, הרצפות שמעבר נושאות פי שמונים ושלושה מן הצפיפות של רצפות המגע (בלי הרשומות של האגנים עצמם בקטלוג, כפי שמסבירה ההערה לטבלה).

12 STUDY מחקר

שלב 1 — הגדרת שאלת המחקר והבעיה. התופעה. הרצפות נקיות, אבל לא באותה מידה (מחקר 7). **הפער בידע.** אם המפזר האחרון הוא כדור הארץ — שלאחר השחרור המשיך להשליך חומר, שחלקו הגיע אל הירח מכל הצדדים (חלק G; מאמר 6, מחקר 9) — אין לצפות למפל לעבר ים אחד; כל רצפה אספה מכתשים מן הרגע שבו קפאה. האם המכתשים על הרצפות, קטנים וגדולים כאחד, מסדרים את הרצפות לפי הזמן שבו קפאו — לא נבדק. **שאלת המחקר:** האם מספר המכתשים על כל רצפה, בכל גודל, מסדר את הרצפות לפי הזמן שבו קפאו, כשימות המגע, שקפאו אחרונים, הם הנקיים ביותר?

שלב 2 — סקירת ספרות (רקע מדעי). בספרות, המכתשים על זרימה מודדים את הזמן מאז הונחה, בשטף של גופים מבחוץ שהוא כמעט זהה בכל מקום [S15]; הזרימות מתוארכות אחת אחת. **מה חדש כאן:** הרצפות מסודרות לפי מרחקן מן המגע, שבמודל קובע מתי קפאו, והצפיפות בכל גודל, מ-1 ק"מ ועד הגדולים ביותר, נקראת מול הסדר הזה. הסדר נקבע על ידי הגאומטריה של מאמר 3 לפני שנספר מכתש כלשהו, ולכן אי אפשר לכוון את המבחן אל התוצאה.

שלב 3 — ניסוח השערת המחקר. ימות המגע קפאו אחרונים; ככל שים נמצא רחוק יותר מן המגע, כך קפא מוקדם יותר ואספ יותר מכתשים, בכל גודל מ-2 ק"מ ומעלה. המכתשים הקטנים ביותר, של 1–2 ק"מ, שנוצרו על ידי רסיסים קלים שפוזרו לכל הצדדים ועל ידי הימות שעדיין היו פעילים על שכניהם, עוקבים אחר הסדר רק בחולשה.

שלב 4 — מערך המחקר (מתודולוגיה). **סוג המחקר:** כמותי; צפיפויות לפי אזור, עם טווחים בדגימה חוזרת. **המדגם:** הרצפות של עשרת הימות הפתוחים של מחקר 7, לאחר הסרת שדות הקרניים; מכתשים של 1–2, 2–5, 5–10, 10–20, 20–40 ק"מ ו-40 ק"מ ויותר. **הכלים:** אותם קטלוג, מפה וכיפות הזנה, וקוד שסופר את המכתשים של כל הרצפות של כל אזור על השטח הכולל שלהן, עם טווחים שנמצאו בדגימה חוזרת של תאים בגודל 5° על 5° , כך שההתקבצות נלקחת בחשבון.

שלב 5 — איסוף הנתונים (ביצוע המחקר). כל ים הוצב באזור שלו לפי הגאומטריה של מאמר 3: המגע, 3,000 הק"מ האחרונים של הקצה (בטווח 1,500 ק"מ מ- 24.1° צפון, 335.2° מזרח: Serenitatis, Imbrium); הגבעה, בסיס הבליטה, ברוחב 6,000 ק"מ (בטווח 3,000 ק"מ מ- 16.6° צפון, 13.1° מזרח: Crisium, Humor, Grimaldi, Smythii, Nectaris); ומעבר (Poincaré, Moscoviense, Orientale). הספירות הן הטבלה של F.6§.

שלב 6 — ניתוח הנתונים ועיבודם. בכל גודל, רצפות המגע נושאות את המכתשים המעטים ביותר. מ-2 ק"מ ומעלה המספר עולה אזור אחר אזור כלפי חוץ: פי שלושה עד ארבעה ב-2–5 ק"מ מן המגע אל הגבעה ופי חמישה אל מעבר, פי שלושה ופי תשעה ב-5–10 ק"מ. מן המכתשים של 10 ק"מ ויותר, רצפות המגע, 626,000 קמ"ר, נושאות שניים; רצפות הגבעה, 359,000 קמ"ר, נושאות 38; הרצפות שמעבר, 83,000 קמ"ר, נושאות 22 — פי שמונים ושלושה ליחידת שטח לעומת המגע, ולפחות פי עשרים וחמישה ב-97 מכל 100 דגימות חוזרות (בלי הרשומות של האגנים עצמם בקטלוג). במילים פשוטות: רצפות המגע הן השטח הגדול ביותר מבין השלושה ונושאות את המכתשים הגדולים המעטים ביותר, בעוד הרצפות הקטנות שמעבר, פחות משביעית מן השטח הזה, נושאות פי אחד-עשר מהן. אף לא מכתש אחד של 20 ק"מ ויותר נמצא על רצפות המגע; אף לא אחד של 20–40 ק"מ נמצא על שלוש הרצפות הקטנות שמעבר. במכתשים של 1–2 ק"מ הסדר נשמר גם כן, אבל בחולשה: פי אחד וחצי וכמעט פי שניים.

שלב 7 — הסקת מסקנות וכתובת הדוח. תוצאה. ההשערה נתמכת: מ-2 ק"מ ועד המכתשים הגדולים ביותר הרצפות מסודרות לפי הזמן שבו קפאו, ימות המגע הנקיים ביותר, ומספר המכתשים עולה כלפי חוץ; המכתשים הקטנים ביותר, הקלים והמפוזרים לכל הצדדים, שומרים על הסדר רק בחולשה. כדור הארץ כמפזר האחרון אינו דורש מפל לעבר ים אחד. **מגבלות.** המרחק מן המגע משמש תחליף לזמן הקפיאה ואינו מודד אותו; רשימת המכתשים הצעירים בעלי הקרניים שהוסרו אינה שלמה; המכתשים הגדולים מעטים על כל רצפה, ולכן היחסים שלהם רחבים. **כיווני מחקר נוספים.** העודף של המכתשים הקטנים הטריים ביבשה בצד הקרוב, שבוחן את כדור הארץ כמקור באופן ישיר (מאמר 6, מחקר 9).

מה שיש בידינו מחלק F: כל רצפת ים קפאה כמפלס אחד, מתחת לשפה וליבשה שלה, שקועה במרכזה, מלבד Imbrium ו-Serenitatis, שמרכזם מוגבה מעט; הימות הרחוקים עומדים בתוך צווארונים שנבנו מן החומר החוזר שלהם עצמם; כל רצפה נקייה בהרבה מן היבשה שלה; והמכתשים המעטים שהרצפות נושאות, שנוצרו אחרונים מחומר מכדור הארץ, מסדרים את הרצפות לפי הזמן שבו קפאו — ימות המגע אחרונים מכולם.

חלק G — גודל ומצב: הימות והמכתשים בזמן

הבעיה

המכתשים שעל רצפות הימות אינם כולם באותו מצב: חלקם מומסים, חלקם מרוחים, חלקם חדים, והמצב הולך אחר הגודל. **הדרך:** מצבו של כל מכתש על רצפות הימות בצד הקרוב נמדד מול גודלו, ונקרא דרך הטמפרטורה והצמיגות של הימות ושל החומר המגיע, ודרך הזמן. חלק זה משותף למאמרים 5 ו-6: הוא שייך לימות ולמכתשים כאחד. המחקר המרכזי שבו ממוספר במשותף עם מאמר 6: הוא מחקר 8 במאמר הזה ומחקר 5 במאמר 6.

החלקים הקודמים טיפלו בכל ים כבפתח מעל כיפת הזנה, וברצפתו כבפני השטח הקפואים של ההתכה שעמדה בפתח הזה. רצפה קפואה היא גם משטח שקולט מכתשים, והמכתשים שהיא נושאת מספרים עד כמה הייתה רכה כשהגיעו. חלק זה קורא את התיעוד הזה. בגודל ומצב אנו מתכוונים לשתי תכונות של כל מכתש, זו לצד זו: הקוטר שלו, ועד כמה שמר על צורתו. מכתש הוא חד כשהוא עמוק כמו מכתש טרי ביבשה באותו קוטר או עמוק ממנו, עם שפה זקופה וקערה פתוחה; מרוח כששפתו עדיין עומדת אבל רצפתו התמלאה בחלקה ודפנותיו התרככו, כך שהוא רדוד באופן ניכר ממכתש ביבשה בגודלו; ומומס כשנשארה ממנו מעט יותר מן הטבעת, והרצפה התמלאה עד קרוב למפלס המישור שסביבו. השאלה פשוטה: האם מצבו של מכתש תלוי בגודלו, ואם כן, מה זה אומר על הזמן שבו רצפות הימות היו עדיין רכות?

החלק מתקדם בשבעה צעדים. סעיף G.1 מראה את שלושת המצבים זה לצד זה על ים אחד. סעיף G.2 מודד את מצבו של כל מכתש בקוטר 3 ק"מ ומעלה על הבזלת של הצד הקרוב מול גודלו (מחקר 8). סעיפים G.3 ו-G.4 מציגים את שני הגורמים שהמודל קורא בתוצאה: התקררות הימות, והשינוי בחומר שהמשיך להגיע מכדור הארץ אחרי השחרור. סעיף G.5 מחבר את שניהם לרצף אחד בזמן. סעיף G.6 פונה אל המכתשים הגדולים שעל מישורי המגע, ששפותיהם נשחקו מלמטה (מחקר 15), ו-G.7 מנסח מה החלק מראה.

לאורך החלק, המגע הוא 3,000 הק"מ האחרונים של בסיס הירח על כדור הארץ — הדסקה שבה הירח נגע לאחרונה בכדור הארץ, שמרכז היום ב- 24.1° צפון 335.2° מזרח (מאמר 3, B.4§); מעבר למגע הוא שאר הבזלת של הצד הקרוב. רצפת ים היא הבזלת שמעל ליבת כיפת הזנה (נספח A); מישור הוא בזלת שאין תחתיה כיפת הזנה, כמו *Tranquillitatis* ו-*Procellarum*.

6.1 שלושה מצבים על רצפה אחת

לפני שמודדים אלפי מכתשים כדאי לראות את שלושת המצבים על משטח אחד. אמת המידה היא יחס העומק לקוטר: עומקו של מכתש מחולק ברוחבו. למכתשים טריים בגודל נתון יש יחס אופייני, ולכן מכתש רדוד בהרבה משכניו ביבשה באותו גודל התמלא או נשחק, ומכתש עמוק כמותם או יותר שמר על צורתו.

בתוך Mare Imbrium שלושה מכתשים מראים שלושה מצבים. *Sinus Iridum*, 246 ק"מ, מומס עד מחציתו: שפתו הצפונית עומדת כהרי Jura, מחציתו הדרומית נעלמה, ורצפתו היא רצפת הים; עומקו רבע מעומקו של מכתש ביבשה בגודלו (יחס עומק לקוטר 0.008 לעומת 0.034). במבט מלמעלה הוא מפרץ: קשת של הרים הפתוחה אל הים, ופני השטח החלקים של הים עצמו נכנסים פנימה במקום שבו הייתה השפה הדרומית. Plato, 101 ק"מ, על החוף הצפוני, שמר על שפתו, אבל רצפתו מלאה וחלקה: הוא מרוח, 0.020 לעומת 0.034, מעט יותר ממחצית העומק של מכתש ביבשה בגודלו. טבעת הדפנות שלו שלמה, אבל בתוכה שוכבת רצפה שטוחה

וכהה במקום קערה. 11 Kirch ק"מ, על רצפת הים, חד, עמוק יותר מן המכתשים ביבשה בגודלו (0.166 לעומת 0.078): קערה נקייה עם שפה חדה. המכתש הגדול מומס, האמצעי מרוח, הקטן חד.

שלושתם נמצאים על אותו ים או לצדו, ולכן הבדלי מקום, קו רוחב או הקרקע שמתחת אינם יכולים להסביר אותם. מה שנבדל הוא הגודל, ועמו, כפי שהסעיפים הבאים מראים, הזמן שבו כל אחד מהם הגיע.

6.2 מצב המכתשים לפי גודל

שני סוגים של התכה. מכתש שנחת על ים פעיל יכול היה להיות מומס בשתי דרכים. נמס ונעלם: הוא נחת, נמס, התפשט ונעלם בזמן שהים היה פעיל, והתמזג עם החומר של הים; לא נשאר ממנו גוף מתחת לפני השטח, לכל היותר שרידים, ולא טבעת; הוא חסר בכל קטלוג, ונראה רק כמחסור של מכתשים על הרצפות. נמס עד טבעת: הוא איבד עומק, רצפתו התמלאה, ורק הטבעת שלו נראית; הוא מופיע בקטלוג כמכתש רדוד בהרבה ממכתש ביבשה בגודלו. בחלק זה מומס לבדו פירושו מכתש שנמס עד טבעת ועדיין נראה; נעלם פירושו מכתש שנמס ונעלם. ההבחנה חשובה כי השניים נספרים בדרכים שונות: מכתש מומס נספר לפי מצבו, ומכתש נעלם רק לפי היעדרו, כחוסר לעומת משטח ששמר על מכתשיו.

המדידה. כל מכתש בקוטר 3 ק"מ ומעלה בצד הקרוב שמרכזו נמצא על בזלת נלקח מן הקטלוג של Wang & Wu [S6], עם עומקו ממודלי הגובה הגלובליים, ושויך לרצפת ים — בתוך ליבת כיפת ההזנה שמתחת לאחד הימות של נספח A — או למישור. יחס העומק לקוטר שלו הושווה ליחס של המכתשים ביבשה באותו גודל, בקו רוחב של עד 60°, כשהבזלת הוצאה ממדגם היבשה. מכתש רדוד מ-95% מן המכתשים ביבשה בגודלו הוא מומס: רק הטבעת שלו נראית. מכתש רדוד מ-75% מהם הוא מרוח. השאר חדים. מתוך 3,478 המכתשים, 324 נמצאים על רצפות הימות ו-3,154 על המישורים.

ההשוואה נעשית גודל אחר גודל מסיבה מסוימת. מכתשים גדולים רדודים מטבעם ביחס לרוחבם יותר ממכתשים קטנים, כך שסף עומק אחד היה מגדיר כל מכתש גדול כמכתש שהתמלא. השוואה של כל מכתש רק עם מכתשים ביבשה בגודלו שלו מסלקת את האפקט הזה: מכתש מוגדר מומס רק אם הוא רדוד כמעט מכל מכתש ביבשה באותו קוטר. המכתשים ביבשה הם הביקורת, כי היבשה הייתה מוצקה כשהם נוצרו ואין בה בזלת.

המכתשים שנעלמו. בהשוואה של שווה מול שווה, בתוך המגע ומעבר לו, רצפות הימות נושאות פחות מכתשים מן המישורים בכל גודל:

היכן	משטח	5-2 ק"מ	10-5 ק"מ	20-10 ק"מ	40-20 ק"מ	+40 ק"מ
המגע	רצפות הימות	263	44	4.6	0	0
המגע	מישורים	836	129	37	23	14
מעבר למגע	רצפות הימות	983	119	65	34	28
מעבר למגע	מישורים	2,107	293	145	90	68

מכתשים למיליון קמ"ר, הצד הקרוב, כששדות הקרניים של מכתשים צעירים הוסרו. הרשומות של האגנים עצמם בקטלוג (300 ק"מ ויותר) הושטו, כמו ב-F68; גרסה קודמת מנתה אותן ונתנה 1.5, 40 ו-69 בעמודה האחרונה (ה-1.5 היה הרשומה של אגן Serenitatis).

הטבלה נקראת בזוגות של שורות: כל שורת רצפה (בכחול) מול שורת המישור שמתחתיה, באותו אזור. המספרים הם צפיפויות, מכתשים למיליון קמ"ר, כך שאפשר להשוות ישירות משטחים בשטח שונה; הקרניים הבהירות של מכתשים צעירים הוסרו, כדי שהמכתשים המשניים שלהם לא ינפחו אף ספירה. הכחול הכהה יותר מסמן את רצפות המגע, שבהן החוסר העמוק ביותר. בתוך המגע הרצפות נושאות כשליש מן המכתשים הקטנים של המישורים שלצדן (263 לעומת 836 ב-5-2 ק"מ), והחוסר גדל עם הגודל, עד אפס ב-20-40 ק"מ לעומת 23

על המישורים. מעבר למגע הרצפות נושאות כמחצית ממה שהמישורים נושאים, בכל גודל. שני המשטחים הם בזלת באותו צד של הירח, חשופים לאותו חומר מגיע; הרצפות איבדו מכתשים שהמישורים שמרו. אלה המכתשים שנעלמו.

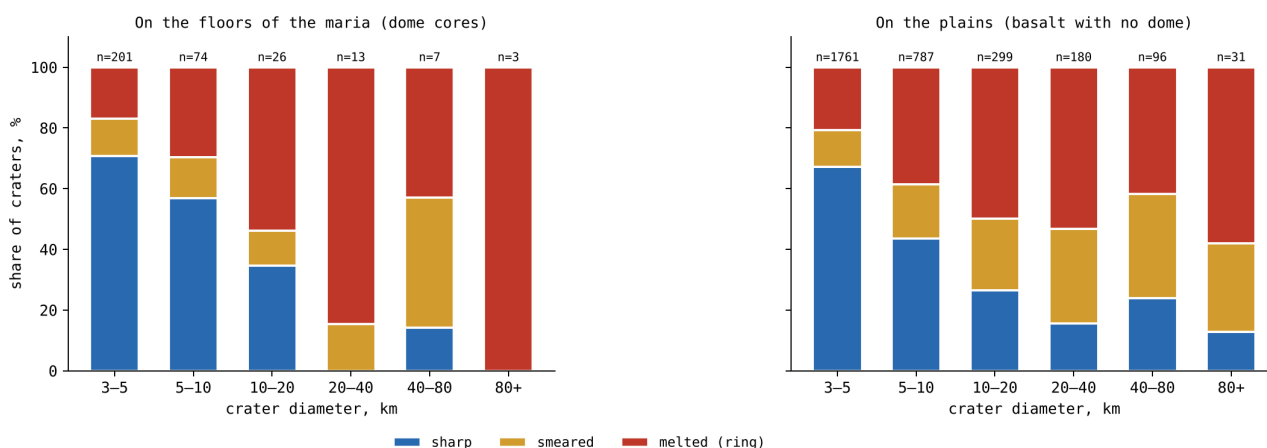
המצב הולך אחר הגודל. על רצפות הימות, המכתשים שנשארו:

גודל	מכתשים	חדים	מרוחים	מומסים
5–3 ק"מ	201	71%	12%	17%
10–5 ק"מ	74	57%	14%	30%
20–10 ק"מ	26	35%	12%	54%
40–20 ק"מ	13	0%	15%	85%
80–40 ק"מ	7	14%	43%	43%
80 ק"מ ומעלה	3	0%	0%	100%

מצב המכתשים על רצפות הימות לפי גודל: חלקם של המכתשים החדים, המרוחים והמומסים.

הצבעים מראים את הכיוון. כשקוראים את הטבלה מלמעלה למטה, מן המכתשים הקטנים אל הגדולים, הכחול של עמודת החדים דוהה, מ-71% מן המכתשים של 5–3 ק"מ ועד אפס מאלה של 40–20 ק"מ, והאדום של עמודת המומסים מעמיק, מ-17% ל-85% ועד כל שלושת המכתשים של 80 ק"מ ומעלה. חלקם של המרוחים נשאר בסביבות אחד משמונה עד הגדלים הגדולים. שורת 80–40 ק"מ, עם שבעה מכתשים בלבד, שוברת מעט את המגמה; שתי השורות האחרונות נשענות יחד על עשרה מכתשים ומוצגות לשם השלמות.

מדוע חלק מומסים שעולה עם הגודל מגלה מתי הרצפה הייתה עדיין רכה? מצבו הסופי של מכתש נקבע על ידי הרצפה שעליה הוא נוחת, ולא על ידי גודלו לבדו: השפעת הגודל כבר הוסרה בהשוואה של כל מכתש עם מכתשים ביבשה בגודלו. אילו כל הגדלים היו מגיעים אל הרצפות באותו זמן, הם היו פוגשים אותה רצפה ומראים אותו תמהיל של מצבים. הם אינם מראים זאת: הגדולים מומסים ברובם, הקטנים חדים ברובם. לכן הגדולים פגשו רצפה רכה יותר מן הקטנים, ופירוש הדבר שהם הגיעו מוקדם יותר, כשהים היה עדיין נוזלי או דייסתי, והקטנים הגיעו מאוחר יותר, כשהוא כבר קפא. גודלו של מכתש על רצפת ים פועל אפוא כשעון של מצב הרצפה; סעיפים G.3–G.5 מסבירים מדוע השניים רצים יחד.



איור 8. המכתשים על הבזלת של הצד הקרוב לפי גודל: חדים (כחול), מרוחים (ענבר) ומומסים, הנראים רק כטבעת (אדום); על רצפות הימות (משמאל) ועל המישורים (מימין), כל אחד מול המכתשים ביבשה בגודלו (G.2§).

איור 8 מראה את אותו מיון לכל תחום גודל, על רצפות הימות ועל המישורים, כששלושת המצבים בצבעי הטבלה. על הרצפות האדום של המכתשים המומסים גדל לעבר הגדלים הגדולים, ואילו הכחול של המכתשים החדים מצטמצם. המישורים מוצגים לצד הרצפות כדי שאפשר יהיה להשוות את שני המשטחים במבט אחד; ההבדל ביניהם במספר המכתשים הוא נושא טבלת הצפיפויות שלמעלה.

המכתשים הקטנים על המגע. על רצפות הימות שבתוך דיסקת המגע (עד 1,500 ק"מ ממרכזה; היא כוללת גם את שולי הרצפה של Humorum), 82% מן המכתשים של 3–10 ק"מ חדים ו-9% מומסים; על הימות שמעבר למגע, 56% ו-28%. על רצפות הימות של המגע אין אף מכתש של 40 ק"מ ומעלה, ויש רק שלושה של 10–40 ק"מ, כולם חדים.

ימות המגע היו האחרונים לקפוא (G.3§): הם שכבו במקום שבו הירח נגע לאחרונה בכדור הארץ, הוזנו הכי הרבה זמן והם העמוקים ביותר — העמוקים בגוף הים עצמו, פנימה, ולא בגובה רצפתו (G.3§). כל מכתש גדול שנחת עליהם בזמן שהיו נוזליים נמס ונעלם, וכך גם רוב המכתשים הקטנים של אותו זמן. מה שנשאר על רצפותיהם הוא מה שהגיע אחרי שקפאו: רסיסים קטנים, שיצרו מכתשים חדים על קרקע מוצקה. לכן ימות המגע נושאים פחות מכתשים מן האחרים, וחלק גדול יותר מאלה שהם נושאים חד. המכתשים הקטנים והחדים שלהם אינם סימן לכך שהם עתיקים ולא נגעו בהם; הם המגיעים המאוחרים מכדור הארץ, שנחתו על רצפה שזה עתה התקשתה.

STUDY 8 המחקר — מחקר 8

STEP 1 הגדרת שאלת המחקר והבעיה

התופעה. על רצפות הימות חלק מן המכתשים נמסו עד טבעת, חלקם מרוחים וחלקם חדים (G.1§); והרצפות נושאות מעט מכתשים. **הפער בידע.** האם מצבו של מכתש על רצפת ים הולך אחר גודלו, והאם מכתשים נעלמו לתוך רצפות הימות בזמן שהמישורים שמרו על שלהם — דבר זה לא נמדד על כל המכתשים מול ביקורת באותו גודל. **שאלת המחקר:** האם רצפות הימות נושאות פחות מכתשים מן המישורים, בהשוואה של שווה מול שווה; האם חלקם של המכתשים המומסים, המרוחים והחדים על הרצפות משתנה עם הגודל; וכיצד המכתשים על רצפות המגע נבדלים מאלה שמעבר לו?

STEP 2 סקירת ספרות (רקע מדעי)

מכתשים על הימות שהוצפו בחלקם בבזלת מאוחרת משמשים זה מכבר למדידת עובי הבזלת: מכתש ששפתו עדיין עומדת מעל הזרימה מגלה כמה עמוקה הזרימה [S16]. הזרימות מתוארכות לפי ספירות של מכתשים שעליהן [S15]. הצמיגות של בזלות הימות נמדדה על דגימות שהובאו לכדור הארץ [S14]. בקריאה הזו, מצבו של מכתש הולך אחר עובי הזרימות המאוחרות, והימות והמישורים הם סוג אחד של משטח. **מה חדש כאן:** הרצפות שמעל כיפות ההזנה מופרדות מן המישורים, וכל המכתשים בקוטר 3 ק"מ ומעלה ממוינים לפי כלל אחד מול מכתשים ביבשה בגודלם שלהם.

STEP 3 ניסוח השערת המחקר

הרסיסים הגדולים הגיעו בזמן שהימות היו פעילים; על ים פעיל הם נמסו, רבים מהם התפשטו והתמזגו עם החומר של הים עד שנעלמו, ואחרים נשארו כטבעות. הרסיסים הקטנים הגיעו בסוף סערת ההתכה, כשרוב הימות כבר קפאו, ונשארו חדים. מכאן: רצפות הימות נושאות פחות מכתשים מן המישורים בכל גודל, בתוך המגע ומעבר לו; על הרצפות חלקם של המכתשים המומסים עולה עם הגודל וחלקם של החדים יורד; ועל ימות המגע, האחרונים לקפוא, המכתשים הגדולים נעלמו, והמכתשים המעטים שנשארו חדים — המגיעים המאוחרים מכדור הארץ.

STEP 4 מערך המחקר (מתודולוגיה)

סוג המחקר: כמותי; צפיפויות ומצבים מושווים בין משטחים, גדלים ואזורים. **המדגם:** 3,478 המכתשים בקוטר 3 ק"מ ומעלה על הבזלת של הצד הקרוב, 324 על רצפות הימות ו-3,154 על המישורים; לצפיפויות, כל המכתשים בקוטר 2 ק"מ ומעלה על אותם משטחים, כשדות הקרניים הוסרו; **הביקורת:** מכתשים ביבשה באותם גדלים, בקו רוחב של עד 60° , כשהבזלת הוסרה. **הכלים:** הקטלוג של Wang & Wu [S6] עם העומקים שבו, מפת הימות של LROC, כיפות ההזנה של נספח A, וקוד שממין כל מכתש לפי הכלל של G.2§.

STEP 5 איסוף הנתונים (ביצוע המחקר)

הכלל נקבע על המכתשים ביבשה בלבד, תחום גודל אחר תחום גודל, לפני שמיון מכתש כלשהו על הבזלת, כדי שאי אפשר יהיה לכוון את הקווים שבין המחלקות לפי התוצאה. אחר כך מיון כל מכתש, שוין לרצפת ים או למישור, ונרשם מרחקו ממרכז המגע (24.1° צפון, 335.2° מזרח). הספירות הן הטבלאות של G.2§.

STEP 6 ניתוח הנתונים ועיבודם

נעלמו. בתוך המגע רצפות הימות נושאות שליש מן המכתשים של 2–5 ק"מ שעל המישורים, שמינית מאלה של 10–20 ק"מ, ואף לא אחד של 20–40 ק"מ לעומת 23 למיליון קמ"ר; מעבר למגע, כמחצית בכל גודל. השינוי עם הגודל. מבחן למגמה עקבית על פני קבוצות מסודרות (מבחן Cochran–Armitage, ששואל אם חלק מסוים עולה או יורד בעקביות מתחום גודל אחד לבא אחריו, ולא נודד באקראי) נותן, על רצפות הימות, עלייה של חלק המומסים וירידה של חלק החדים עם הגודל, כל אחת בהסתברות של פחות מאחד לעשרה מיליארד להופיע במקרה; מכתש אחר מכתש, ככל שהמכתש גדול יותר, הוא רדוד יותר ביחס ליבשה (מתאם דרגות -0.26 ; מתאם דרגות מודד אם גודל אחד נוטה לרדת כשהאחר עולה, מ-1 – לירידה מושלמת ועד +1 לעלייה מושלמת). המגע. מן המכתשים של 3–10 ק"מ, 93 מתוך 113 על רצפות המגע חדים, לעומת 91 מתוך 162 מעבר לו (המבחן המדויק של Fisher, שנותן את ההסתברות המדויקת לחלוקה לא שוויונית כזו בין שתי קבוצות אילו לשתייהן היה אותו חלק אמיתי: כחמישה למיליון); אין אף מכתש של 40 ק"מ ומעלה על רצפות המגע, ושלושת המכתשים של 10–40 ק"מ חדים.

STEP 7 הסקת מסקנות וכתיבת הדוח

תוצאה. ההשערה נתמכת: על רצפות הימות מכתשים נמסו ונעלמו, והתמזגו עם החומר של הים הפעיל, בזמן שהמישורים שמרו על שלהם; מצבם של המכתשים שנשארו הולך אחר הגודל, מומס לגדולים וחד לקטנים; ועל ימות המגע, האחרונים לקפוא, המכתשים הגדולים נעלמו והמכתשים שנשארו חדים. **מגבלות.** עומקו של מכתש קטן נמדד פחות טוב מזה של מכתש גדול; המחלקות נשענות על כלל שקובע את הקווים ב-95 וב-75 מכל 100 מכתשים ביבשה; המכתשים הגדולים על הרצפות מעטים; והמצב לבדו אינו מגלה אם מכתש נמס או כוסה בזרימה מאוחרת. **כיווני מחקר נוספים.** שרידים של המכתשים שנעלמו בשדה הכבידה שמתחת לרצפות ימות המגע; המכתשים הגדולים של מישורי המגע (מחקר 15).

6.3 הימות: טמפרטורה, צמיגות וזמן

מחקר 8 קבע את הדפוס. סעיף זה והבא אחריו מציגים את גורמיו: כאן, הרצפה שקולטת את המכתש; ב-G.4§, החומר שיוצר אותו. התכונה המרכזית של הרצפה היא הצמיגות שלה, ההתנגדות שלה לזרימה: למים צמיגות נמוכה, לדבש גבוהה יותר, ליפת קרה גבוהה מאוד. רצפה בעלת צמיגות נמוכה נסגרת מעל מכתש; רצפה בעלת צמיגות גבוהה מאוד שומרת עליו.

הצמיגות. התכה של בזלת ים היא נוזלית: ללבות שהביאו משימות Apollo צמיגות בסדר גודל של 1 Pa s ליד הליקווידוס שלהן [S14], כ- $1,200^\circ \text{C}$. הליקווידוס הוא הטמפרטורה שמעליה ההתכה נוזלית כולה; 1 Pa s הוא בערך פי אלף מצמיגות המים, קרוב לזו של גליצרין. כשההתכה מתקררת מתחת לליקווידוס, גבישים גדלים בתוכה; כשהם מתקרבים למחצית מנפחה ההתכה מפסיקה לזרום, וצמיגותה עולה בסדרי גודל רבים לפני שהיא

קופאת בסולידוס, כ-1,050°C. הסולידוס הוא הטמפרטורה שמתחתיה לא נשאר נוזל כלל. ים עובר שלושה מצבים כשהוא מתקרר — נוזל, דיסה, מוצק — והחומר שנוחת עליו פוגש כל אחד מהם בתורו. הדיסה היא המצב האמצעי, המון גבישים ובינם התכה, כמו חול רטוב או גבס שמתקשה: היא מחזיקה צורה לזמן מה אבל נכנעת לאט.

מה נחיתה עושה בכל מצב. על ים נוזלי החומר החוזר שוקע ומתערבב, המכתש נסגר מאחוריו, ולכל היותר נשאר חלק מן השפה שעמד על קרקע יציבה: המכתש מומס. על דיסה המכתש מחזיק את צורתו לזמן מה; דפנותיו קורסות, רצפתו מתמלאת, שפתו שורדת: המכתש מרוח. על רצפה קפואה המכתש שומר על צורתו המלאה: הוא חד. התמונה היא של כף הנלחצת לתוך סיר של דיסה מתקררת: בסיר החם השקע נסגר מיד, בסיר המסמך הוא מתמלא לאט ושוליו שוקעים, ובסיר הקר שהתקשה הוא נשאר. Sinus Iridum הוא המקרה הראשון — שפתו הדרומית, שעמדה על הים הנוזלי, נעלמה, ושפתו הצפונית, על החוף היציב, נשארה כהרי Jura; Plato הוא השני; Kirch השלישי.

זמן. ים קופא מלמעלה. המכסה הקפוא מתעבה כשורש הזמן,

$$\delta(t) \approx 2\lambda\sqrt{\kappa t}, \quad t_{\text{freeze}} \propto \frac{h^2}{\kappa},$$

כאשר $\kappa \approx 10^{-6} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ היא הדיפוזיביות התרמית, λ קבוע מסדר גודל אחד שנקבע על ידי החום הכמוס, h (2) עומק ההתכה. במילים: החום עוזב את ההתכה דרך המכסה שכבר קפא מעליה, וככל שהמכסה עבה יותר, החום בורח לאט יותר, כך שכל מטר נוסף של מכסה לוקח יותר זמן מן הקודם; העובי δ גדל כשורש הזמן t . הדיפוזיביות התרמית κ מודדת באיזו מהירות חום מתפשט בחומר; החום הכמוס הוא החום שהתכה צריכה למסור כדי לקפוא, מעבר למה שהיא מוסרת בהתקררות. מכאן נובע הקשר השני: הזמן לקפיאת כל העומק h גדל כריבוע העומק. ים עמוק פי עשרה נשאר נוזלי פי מאה זמן. ימות המגע הזנו הכי הרבה זמן והם העמוקים ביותר. העמוקים כאן הוא עומקו של גוף הים עצמו, הנמדד פנימה, ולא גובה רצפתו: מרכזי רצפותיהם עומדים מוגבהים מעט, Serenitatis ב-60° מ' ו-Imbrium ב-43° מ'. החומר בעומק הזה היה חם, ולכן הם נשארו נוזליים הכי הרבה זמן; והם היו הקרובים ביותר למקור החום של הירח עצמו — סיבה שנייה לכך שהם קפאו אחרונים. בזמן שהיו נוזליים, המכתשים הגדולים שנחתו עליהם בזמן שהיו נוזליים נמסו ונעלמו לתוך הים: לא נשאר על רצפותיהם אף מכתש של 20 ק"מ ומעלה. ימות השוליים, שנותרו מוקדם יותר והם רדודים יותר, קפאו ראשונים, וחלק מן המכתשים הגדולים שעליהם שרדו כטבעות.

6.4 החומר המגיע: טמפרטורה, גודל ומרחק

השעון השני נמצא בחומר שנוחת. במודל כ-99% מן המכתשים נוצרים על ידי חומר חוזר מכדור הארץ (מאמר 6), והתפוקה של כדור הארץ לא נשארה זהה אחרי השחרור.

כדור הארץ המשיך לזרוק. ברגע השחרור כדור הארץ לא נעצר. הפתחים שלו המשיכו לזרוק חומר; רובו נפל בחזרה אל כדור הארץ, וחלקו הגיע אל הירח ונחת עליו. כדי להגיע אל הירח במרחק r ממרכז כדור הארץ, החומר צריך לעזוב את פני השטח של כדור הארץ במהירות

$$v_{\min} = \sqrt{2GM_{\oplus} \left(\frac{1}{R_{\oplus}} - \frac{1}{r} \right)},$$

8.8 ק"מ לשנייה לירח ב-17,000 ק"מ, 9.9 ב-30,000 ק"מ ו-10.6 ב-60,000 ק"מ ($R_{\oplus} = 6,371$ ק"מ). כאן G (3) הוא קבוע הכבידה, $M_{\oplus}$ מסת כדור הארץ ו- $R_{\oplus}$ רדיוסו. המשוואה היא מאזן אנרגיה: רסיס שעוזב את פני השטח צריך לשאת די אנרגיית תנועה כדי לטפס החוצה מן הכבידה של כדור הארץ, מפני השטח ועד למרחק הירח. ככל שהירח התרחק, המהירות הנדרשת עלתה לעבר מהירות המילוט של כדור הארץ, המהירות שבה רסיס עוזב את כדור הארץ לגמרי. ב-17,000 ק"מ, קרוב למרחק השחרור, רסיס שכדור הארץ יכול היה לזרוק ב-8.8 ק"מ לשנייה

הגיע אל הירח; כשהירח כבר עמד ב-60,000 ק"מ, אותו רסיס נפל בחזרה, ורק אלה שנזרקו ב-10.6 ק"מ לשנייה או יותר הגיעו.

הגדולים קודם, הקטנים אחר כך. ככל שהירח התרחק, רסיס נזקק למהירות גבוהה יותר כדי להגיע אליו (משוואה 3). כבידת כדור הארץ החזירה את הרסיסים הגדולים, ואילו הקטנים, שהירח מושך בקלות, עוד הגיעו. הרסיסים הגדולים יצאו ראשונים; כשסערת המאגמה בכדור הארץ שככה, נזרקו רסיסים קטנים יותר, עדיין חמים. כל עוד הירח היה קרוב, רסיסים גדולים הגיעו אליו; ככל שהתרחק, רק קטנים יותר הגיעו. גודלו של המכתש הגדול ביותר שנוצר על הימות יורד עם הזמן.

הכול חם; הרצפות התקררו. החומר עזב כדור ארץ חם בצמיגות נמוכה, במצבו של החומר החוזר שבנה את מכתשי הקליפה (מאמר 6, חלק J), ונשאר חם עד הסוף: הרסיסים הגדולים תחילה, ואחר כך, כשסערת המאגמה שככה, רסיסים קטנים יותר, עדיין חמים. מה שהשתנה הוא הרצפה שקלטה אותם. רסיס קטן שנחת על רצפה שכבר קפאה יוצר את המכתש החד ביותר: Kirch. היחס שלו, 0.166, יותר מפי שניים מזה של מכתש ביבשה בגודלו, הוא מה שרסיס קטן משאיר על רצפה קפואה.

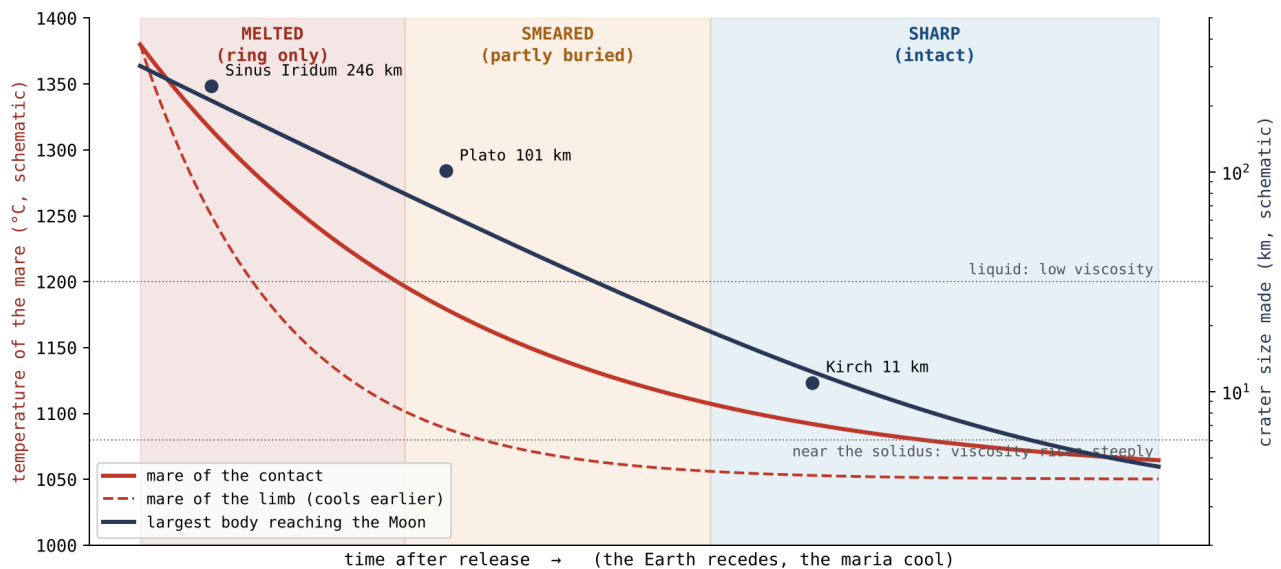
6.5 השרשרת בזמן

שני שעונים רצים יחד: הימות מתקררים, והחומר המגיע מכדור הארץ, חם לאורך כל הדרך, נעשה קטן יותר. מכיוון ששניהם רצים באותו כיוון, מכתש גדול הוא כמעט תמיד מכתש מוקדם, ומכתש מוקדם פגש כמעט תמיד רצפה רכה. זו הסיבה שגודל ומצב קשורים זה בזה על רצפות הימות.

שלב	כדור הארץ	הימות	המכתש	דוגמה
מוקדם	קרוב; רסיסים גדולים וחמים מגיעים אל הירח	נוזליים, צמיגות נמוכה	מומס	Sinus Iridum
אמצעי	מתרחק; רסיסים בגודל בינוני	דייסה, הצמיגות עולה	מרוח	Plato
מאוחר	רחוק; רק רסיסים קטנים, עדיין חמים	קפואים	חד	Kirch

השרשרת בזמן: מצב כדור הארץ, מצב הימות והמכתש ששניהם יחד משאירים, בשלושה שלבים.

הטבלה נקראת מלמעלה למטה כפי שהזמן רץ, וצבעי השורות הולכים אחר הטמפרטורה של הימות: אדום לשלב המוקדם, כשהרצפות היו נוזליות, ענבר לאמצעי, כחול לשלב המאוחר, כשהן כבר קפאו. כל שורה מחברת את מצב כדור הארץ, את מצב הימות ואת המכתש ששניהם יחד משאירים, עם הדוגמה של G.1§.



איור 9. שני השעונים אחרי השחרור, באופן סכמטי: הטמפרטורה של ים במגע (אדום רציף) ושל ים בשוליים (מקווקו), וגודלו של המכתש הגדול ביותר שנוצר על ידי חומר שמגיע אל הירח מכדור הארץ (כחול כהה). הרקע מסמן את המצב שנחיתה משאירה: מומס, מרוח, חד. אין כוונה לשנים מסוימות (G.5§).

איור 9 משרטט את אותה שרשרת כעקומות. הזמן רץ ימינה. העקומות האדומות יורדות כשהימות מתקררים, העקומה המקווקו של השוליים מוקדם יותר מן העקומה הרציפה של המגע; העקומה הכחולה הכהה יורדת ככל שהרסיס הגדול ביותר שיכול להגיע אל הירח נעשה קטן יותר. הרקע המוצלל מראה איזה מצב נחיתה משאירה בכל רגע. מקומו של מכתש באיור נקבע לפי הזמן שבו הגיע ולפי הים שעליו נחת: מכתש גדול יכול להימצא רק בצד שמאל, שם הרקע מומס, ומכתש על המגע נשאר ברצועה המומסת זמן רב יותר ממכתש בשוליים.

הסדר נקרא בלי שנים. על ימות השוליים אותה שרשרת רצה מוקדם יותר, כי הם קפאו ראשונים: מכתש גדול שהיה נמס על המגע יכול היה להישאר חד בשוליים.

6.6 מישורי המגע: חום מלמטה, והשפה

רצפות ימות המגע אינן נושאות אף מכתש גדול. אבל המכתשים הגדולים של המגע אינם חסרים: הם נמצאים על המישורים שלו, ושפותיהם נושאות סוג שני של שחיקה. סעיף זה שואל מה שחק אותן.

המכתשים הגדולים של המגע נמצאים על המישורים שלו. מתוך 41 המכתשים של 40 ק"מ ומעלה על הבזלת בתוך המגע, אף לא אחד נמצא על רצפת ים: 37 נמצאים על המישורים, 22 מהם על Procellarum, ו-4 על הבזלת של Serenitatis-Imbrium מחוץ לליבות הכיפות שלהם. אף אחד אינו חד, 33 מומסים ו-8 מרוחים. מעבר למגע, על המישורים, 27 מתוך 85 חדים ו-25 מומסים (גרסה קודמת נתנה 27 מתוך 86, כשמנתה איתם מכתש של 64 ק"מ על הבזלת של Serenitatis, השוכן 1,507 ק"מ ממרכז המגע, ממש מחוץ לדיסקה). רובם בגודל בינוני: מחציתם של 40–60 ק"מ, וארבעה עולים על 120 ק"מ.

הספרות. המכתשים על הימות נוצרו על ידי גופים מבחוץ; הבזלת שבאה אחריהם הציפה את הקרקע שסביבם. הצפה מגביהה את הקרקע שמחוץ למכתש, כך שהשפה שנשארת חשופה עומדת נמוך יותר מעליה, אף שהרכס עצמו אינו מונמך [S16, S25]; מכתש עמוק מן הזרימה שומר על שפתו כטבעת מעליה. בקריאה הזו שפה נמוכה על מישור של ים מודדת את עובי הבזלת שהונחה סביבה. התמונה היא של ארמון חול שהמים עולים סביבו: המים מסתירים את המדרונות התחתונים והארמון נראה נמוך יותר, אבל ראשו לא נפגע.

המודל. מישורי המגע שכבו מעל כדור הארץ: החום שהגיע אליהם בא מלמטה, מכדור הארץ שמתחתם. מכתש שנחת עליהם אחרי אמצע הסערה, רסיס בגודל בינוני שנוזק מכדור הארץ, פגש מישור חם; המישור שחק את

השפה במקום שבו נגע בה, בצד שפונה אליו. הרכס עצמו הונמך והוקהה. בתמונה שלמעלה, אין אלה מים העולים סביב הארמון אלא קרקע חמה מתחתיו שמרככת צד אחד, כך שהראש עצמו שוקע. ב-Imbrium החום בא מתחת למכתש, מן הירח, דרך הפתח: המכתש נמס מרצפתו כלפי מעלה, ושפתו, שעמדה על קרקע יציבה יותר, נשמרה.

המבחן המפריד. שתי הקריאות מנבאות דברים שונים, והמבחן בנוי על ההבדל. הצפה מגביהה את הקרקע בצד המכתש שפונה אל הבזלת, על כל מישור באותה מידה. חום מלמטה שוחק את השפה בצד שפונה אל המישור החם, במקום שבו המישור היה חם: על מישורי המגע, ולא על המישורים שמעבר לו. לכל מכתש של 40 ק"מ ומעלה על הבזלת של הצד הקרוב נעקב רכס השפה על 36 חתכים רדיאליים של מודל הגובה ב-64 פיקסלים למעלה, מול מישור שהותאם לקרקע ב-1.6–2.4 רדיוסים; כל כיוון סווג כפונה אל מישור או כפונה אל היבשה, לפי הקרקע שמעבר לשפה. חתך רדיאלי הוא קו של גבהים הנמתח החוצה ממרכז המכתש, אחד בכל 10° סביבו; בכל אחד מהם הרכס נמצא כשיא, וגובהו נמדד מעל הקרקע שמסביב.

מכתשים של 40 ק"מ ומעלה	מכתשים	הרכס מעל הקרקע (מ')	שפה חסרה, צד המישור פחות צד היבשה
מישורי המגע	29–33	393–590	(עד 35 10) +24%
מישורים מעבר למגע	34–39	627–960	0% (עד 0 -6)
הבזלת של Imbrium ו-Serenitatis	4	148–1,721	(עד 11 +) (-18 עד 3) +3%
יבשה, הצד הקרוב	590	616–1,006	—

רכס: חציונים לפי תחום גודל, 40–60, 60–100 ו-100 ק"מ ומעלה. חסרה: חלק הכיוונים שבהם לא נמצא רכס בבולטות של 50 מ', בכיוונים הפונים אל המישור פחות בכיוונים הפונים אל היבשה, מכתש אחר מכתש; רווחים של 95% בדגימה חוזרת.

השורה האדומה היא מישורי המגע, הקבוצה האחת שהמודל מפריד; השורות שמתחתיה הן ההשוואות. העמודה השלישית נותנת את גובה הרכס מעל הקרקע, כטווח על פני שלושת תחומי הגודל; הרביעית שואלת, לכל מכתש, בכמה יותר מן הכיוונים הפונים אל המישור מאשר מן הכיוונים הפונים אל היבשה השפה אינה נמצאת כלל. רכס בבולטות של 50 מ' הוא שיא העומד לפחות 50 מ' מעל השקעים שמשני צדיו. המספרים שבסוגריים הם רווחים של 95% שהתקבלו בדגימה חוזרת: המכתשים נדגמים מחדש באקראי פעמים רבות, והטווח שמכסה 95 מכל 100 תוצאות של דגימה חוזרת מראה עד כמה הערך יציב. רק השורה האדומה בולטת בשתי העמודות: רכסים נמוכים יותר, ושפות החסרות בצד המישור.

על מישורי המגע הרכס עומד 345–375 מ' נמוך יותר מאשר על המישורים שמעבר למגע וביבשה, והשפה חסרה ברבע יותר מן הכיוונים הפונים אל המישור מאשר מן הכיוונים הפונים אל היבשה. על המישורים שמעבר למגע, שבהם אותה בזלת שוכבת סביב המכתשים, השפה אינה חסרה יותר לעבר המישור מאשר לעבר היבשה. על שני סוגי המישורים הרכס שנשאר עומד נמוך יותר בצד המישור, בכ-220–270 מ', כפי שהצפה מנבאת על כל מישור. שני האפקטים קיימים אפוא: הצפה, הנראית על כל מישור, ואובדן של שפה בצד המישור, הנראה רק על המגע.

צורת הרכס. הצפה עולה לאורך הצלע החיצונית ואינה מגיעה אל הרכס, כך שרכס מוצף שומר על צורתו; רכס שנשחק בחום הוא קהה. במקום שבו רכס שורד, צורתו נקראה על מודל הגובה ב-512 פיקסלים למעלה (SLDEM2015, 60) [S26], חתך אחר חתך: החדות (העקמומיות בראש), רוחב הרכס 50 מ' מתחת לראשו, והזווית שבין המדרון הפנימי לחיצוני. לסכין יש עקמומיות גבוהה, רוחב צר מתחת לראשה וזווית קטנה; לכיכר לחם מעוגלת יש עקמומיות נמוכה, ראש רחב וזווית רחבה.

צד המישור פחות צד היבשה, מכתש אחר מכתש	חדות (מ'קמ"ר)	רוחב הרכס, 50 מ' מתחת (ק"מ)	הזווית ברכס
מישורי המגע (29)	(-18 עד -46) -35	(עד 0.31 0.03) +0.14	(עד 7.0 2.0) +5.3°
מישורים מעבר למגע (34)	(-32 עד +34) -11	אין הבדל	(עד 2.8 0.3) +1.3°
יבשה, הצד הקרוב (77)	(-18 עד +11) -6	אין הבדל	(עד 3.3 0.2) +1.8°

רווחים של 95% בדגימה חוזרת של תאים בגודל 5° על 5°. צד היבשה של כל מכתש הוא הביקורת שלו עצמו.

כל ערך הוא הפרש בתוך מכתש אחד: הרכס בצד המישור שלו פחות הרכס בצד היבשה שלו. חדות שלילית ורוחב וזווית חיוביים פירושים רכס קהה יותר בצד המישור. מכיוון שכל מכתש מושווה לעצמו, הבדלי גודל, גיל וקו רוחב בין מכתשים מתבטלים. כאן הדגימה החוזרת שולפת תאים שלמים של 5° על 5° ולא מכתשים בודדים, כדי שמכתשים שכנים, שאינם בלתי תלויים, יישלפו יחד. השורה האדומה של המגע היא היחידה שבה כל שלושת המדדים מצביעים לאותו כיוון ברווחים שאינם כוללים אפס.

על מישורי המגע הרכס ששורד בצד המישור קהה יותר מאשר בצד היבשה: פחות חד, רחב יותר וזווית רחבה יותר. על המישורים שמעבר למגע וביבשה שני הצדדים נבדלים מעט, וההבדל בזווית נעלם כשמשותפים רק במודל הגובה המפורט ביותר. לעומת המישורים שמעבר למגע, הזווית של המגע רחבה יותר ב-4.0° (עד 0.4 עד 6.3). הצפה אינה יכולה להקהות רכס שאינה מגיעה אליו; מישור חם מתחת לשפה יכול.

STUDY 15 המחקר — מחקר 15

STEP 1 הגדרת שאלת המחקר והבעיה

התופעה. המכתשים הגדולים על הבזלת של המגע מומסים, אף אחד אינו חד, ואף לא אחד נמצא על רצפת ים (מחקר 8). **הפער בידע.** שפה נמוכה על מישור של בזלת נקראת כשפה החשופה מעל הצפה; האם השפות של מישורי המגע אבדו בדרך אחרת — דבר זה לא נבדק. **שאלת המחקר:** האם השפות של המכתשים הגדולים על מישורי המגע נמוכות ושבורות יותר מאשר במקומות אחרים, והאם הן אבדו בצד שפונה אל המישור רק במקום שבו המישור היה חם?

STEP 2 סקירת ספרות (רקע מדעי)

מכתשים על הימות שהוצפו בחלקם בבזלת מאוחרת משמשים למדידת עובי הבזלת: ההצפה מגביה את הקרקע שמחוץ למכתש, והשפה החשופה עומדת נמוך יותר מעליה [S16, S25]. Du ועמיתיו מצאו 262 שפות חשופות במלואן, 360 חשופות בחלקן ו-39 מוסתרות לגמרי, ועובי בזלת של 33–455 מ' סביב 41 מהן [S16]. **מה חדש כאן:** רכס השפה נעקב ב-36 כיוונים, כל אחד מסווג לפי הקרקע שהוא פונה אליה, ומישורי המגע מושווים למישורים שמעבר לו, שבהם אותה הצפה הייתה פועלת.

STEP 3 ניסוח השערת המחקר

מישורי המגע חוממו מלמטה על ידי כדור הארץ שמתחתם; המישור החם שחק את השפות של המכתשים שנחתו עליו, במקום שבו נגע בהן. מכאן: על מישורי המגע הרכסים נמוכים יותר מאשר על המישורים שמעבר לו וביבשה, והשפה אבדה יותר בצד שפונה אל המישור; על המישורים שמעבר למגע, שלא חוממו מלמטה, אין אובדן כזה בצד המישור.

STEP 4 מערך המחקר (מתודולוגיה)

סוג המחקר: כמותי; רכסים ורצפות לפי קבוצה, והכיוונים הפונים אל המישור מול הכיוונים הפונים אל היבשה, מכתש אחר מכתש. **המדגם:** 137 המכתשים של 40 ק"מ ומעלה על הבזלת של הצד הקרוב (37 על מישורי

המגע, 85 על המישורים שמעבר לו, 5 על הבזלת של Serenitatis-I Imbrium מחוץ לליבות הכיפות שלהם, אחד מהם, על Serenitatis, ממש מחוץ לדיסקת המגע, ול-4 מהם רכס שאפשר למדוד; 10 על רצפות הימות) ו-592 מכתשים ביבשה באותם גדלים, בצד הקרוב, בקו רוחב של עד 60°. **הכלים:** הקטלוג של Wang & Wu [S6], מודל הגובה LOLA ב-64 פיקסלים למעלה, מפת הימות של LROC, וקוד שעוקב אחר הרכס על 36 חתכים רדיאליים.

שלושת הכללים של המעקב, ומדוע נבחר כל אחד:

כלל	מדוע, במילים פשוטות
הקרקע: מישור שהותאם ב-1.6–2.4 רדיוסים	המפלס הנוכחי סביב המכתש, אותו כלל לכל הקבוצות
הרכס: השיא הגבוה ביותר בבולטות של 50 מ' ב-0.8–1.2 רדיוסים, חתך אחר חתך	שפה הנראית כרכס, לא כממוצע על פני טבעת
כיוון פונה אל מישור כשמחצית הקרקע ב-1.2–1.6 רדיוסים היא בזלת	כדי להבחין בין הצד שנגע במישור לבין הצד שנגע ביבשה

שלושת הכללים של מעקב הרכס, והסיבה לכל אחד.

5 STEP איסוף הנתונים (ביצוע המחקר)

לכל מכתש הותאם מישור הקרקע, הרכס נעקב על כל אחד מ-36 החתכים, וכל חתך סווג כפונה אל מישור או אל היבשה. מכתשים שלא הייתה סביבם די קרקע למישור נשמרו בפלט; מישורי קרקע חלופיים, של היבשה בלבד ושל כל הקרקע, נקראו כבדיקות. הערכים הם הטבלה של G.6§.

6 STEP ניתוח הנתונים ועיבודם

הרכס. על מישורי המגע הרכסים עומדים 375 מ' נמוך יותר מאשר על המישורים שמעבר לו (רווח של 95%: 44–615 מ') ו-345 מ' נמוך יותר מאשר ביבשה (167–450 מ'); עם כל אחד ממישורי הקרקע החלופיים ההבדל נשאר, 219–422 מ'. **הצד שפונה אל המישור.** על מישורי המגע השפה חסרה ב-24% יותר מן הכיוונים הפונים אל המישור מאשר מן הכיוונים הפונים אל היבשה (10%–35%), ואותו הדבר מתקיים גם בין המכתשים הקטנים מ-100 ק"מ לבדם; על המישורים שמעבר למגע ההבדל הוא 0 (6– עד 0). על שניהם, הרכס שנשאר נמוך יותר בצד המישור, ב-265 וב-217 מ'. **הרצפה.** הרצפות שוכבות קרוב למפלס הקרקע על מישורי המגע ועל המישורים שמעבר לו כאחד; הן אינן מפרידות בין השניים. **צורת הרכס.** על מישורי המגע הרכס ששורד קהה יותר בצד המישור: החדות נמוכה ב-35 מ'/קמ"ר (18–46), הרוחב 50 מ' מתחת לראש גדול ב-0.14 ק"מ (0.03–0.31), הזווית רחבה ב-5.3° (2.0–7.0); מעבר למגע החדות והרוחב אינם נבדלים, והזווית נבדלת ב-1.3°, הבדל שנעלם במודל המפורט ביותר לבדו. בהתאמה של מכתש מול מכתש, באותו קוטר, קו רוחב ועומק פנימי, אפשר היה ליצור רק ארבעה זוגות של מכתש מן המגע ומכתש מעבר לו — מעט מדי כדי להשוות את שתי הקבוצות ישירות. **Imbrium.** ארבעת המכתשים על הבזלת של Serenitatis-I Imbrium אינם מאבדים את שפתם יותר לעבר המישור מאשר לעבר היבשה (+3%); הרכס של Sinus Iridum עומד 1,721 מ' מעל הקרקע.

7 STEP הסקת מסקנות וכתיבת הדוח

תוצאה. ההשערה נתמכת: על מישורי המגע השפות נמוכות יותר ואבדו בצד שפונה אל המישור, ועל המישורים שמעבר למגע, שהוצפו באותה מידה, לא; ההנמכה של הרכס הנותר בצד המישור, המשותפת לשניהם, היא עבודתה של ההצפה, ואילו אובדן השפה, וההקפיה של הרכס ששורד בצד המישור, הם עבודתו של המישור החם של המגע. **מגבלות.** מישור הקרקע הוא המפלס הנוכחי, לא הקרקע שעליה נחת המכתש; רכס שהמעקב לא מצא אינו הוכחה שאין שם שפה; המכתשים על Imbrium מעטים; החום מכדור הארץ שמתחת למגע מוסק, לא נמדד. רק הרכסים ששורדים ניתנים למדידת צורה, וההשוואה המותאמת בין המגע לבין מה שמעבר לו נשענת

על ארבעה זוגות. **כיווני מחקר נוספים.** מדגם מותאם גדול יותר של מכתשים מן המגע ומעבר לו, בעומק פנימי שווה, על מודל הגובה המפורט ביותר.

6.7 מה זה מראה

המכתשים על הימות מתעדים את כדור הארץ אחרי השחרור. חומר המשיך להגיע ממנו — גדול בהתחלה, קטן יותר עם הזמן, חם לאורך כל הדרך — בזמן שהימות התקררו מתחתיו. המכתשים הגדולים שנחתו על רצפות נוזליות נעלמו או נמסו עד טבעות; הבינוניים שפגשו דייסה נמרחו; הקטנים שבאו אחרונים, על רצפות קפואות, נשארו חדים; ועל מישורי המגע, שחוממו מכדור הארץ שמתחתם, השפות של המכתשים הגדולים נשחקו בצד המישור החם. פעילותו של כדור הארץ דעכה עם הזמן, אבל היא נמשכה אחרי השחרור, וגודלם ומצבם של המכתשים על הימות הם התייעוד שלה.

חלק H — המנוע

הבעיה

פתח חי כל עוד ההתכה שלו מוזנת ויכולה לזרום. **הגישה:** מוצגים התנאים של לחץ, ציפה, צמיגות, חומרים נדיפים וחום, יחד עם מה שחושב ומה שעוד נותר לחשב.

חלקים C-G תיארו מהו ים: פתח מעל כיפת הזנה, שרקעיתו קפאה ושקעה, ותיעוד מכתשים שמספר מתי היא קפאה. חלק זה שואל מה גרם לפתח כזה לפעול — מה הניע את החומר כלפי מעלה דרכו, ומה קבע מתי הוא נעצר. אנו קוראים לכך *המנוע* של הפתח. למנוע ארבעה רכיבים, ונדון בהם בזה אחר זה: הכוח שדוחף את החומר כלפי מעלה, ומדוע הוא חייב להינשא בנוזל (H.1§); החומרים הנדיפים, שמקלים את ההתכה ועוזרים לה לזרום (H.2§); השטף, כמות החומר שעוברת בפתח, וכיצד ירידתו אוטמת את הפתח (H.3§); וחום כדור הארץ, שהחזיק את הפתחים של הצד הקרוב פתוחים כל עוד הגוף היה מחובר (H.4§). חלק מן התנאים האלה מחושבים כאן; התנאי שדורש חישוב תרמי מלא, השטף הקריטי, מוצג כדרישה ומרוכז בחלק M.

H.1 לחץ, ציפה וצמיגות

הכוח נישא בנוזל. גוף מוצק היה צריך לשאת מאמץ של 13–16 ג'יגה-פסקל מול חוזק של כ-0.2 ג'יגה-פסקל — פי שישים עד שמונים יותר מדי; לנוזל אין חוזק מתיחה, והוא זורם. מאמץ הוא כוח מחולק בשטח שנושא אותו, וחוזקו של חומר הוא המאמץ הגדול ביותר שהוא יכול לשאת זמן רב בלי להישבר או לזחול; ג'יגה-פסקל אחד הוא בערך פי עשרת אלפים מלחץ האוויר בגובה פני הים. לכן שום חומר מוצק של הקליפה לא יכול היה לשאת את העומס; הוא היה נשבר וזורם הרבה לפני כן. נוזל אינו זקוק לחוזק כדי להעביר דחיפה. הוא מעביר לחץ מקצה אחד לקצה השני, כפי שהנוזל בצנרת הבלמים של מכונית מעביר את הדחיפה של הדוושה אל הגלגלים: הנוזל עצמו אינו מתנגד לדבר, הוא רק מעביר. זו הסיבה שהמנוע של פתח הוא עמוד של התכה ולא בוכנה מוצקה.

לפיכך פתח חי כל עוד ההתכה שלו מוזנת בלחץ ובציפה, וצמיגותה נמוכה דיה כדי לזרום מתחת לקליפה חזקה. שני כוחות דוחפים את ההתכה כלפי מעלה. *הלחץ* הוא הדחיפה מן המקור שמתחת, המועברת כלפי מעלה דרך הנוזל. *הציפה* היא העילוי שנוזל קל יותר חש בתוך סביבה צפופה ממנו, כפי שפקק עולה במים. *הצמיגות* היא ההתנגדות של נוזל לזרימה: לדבש צמיגות גבוהה ולמים צמיגות נמוכה. התכה בעלת צמיגות נמוכה יכולה לנוע דרך הפתח בזמן שהקליפה החזקה סביבה שומרת על צורתה; התכה בעלת צמיגות גבוהה נתקעת.

הצמיגות תחומה משני הצדדים: המים מגבילים אותה מלמעלה, והצורך לשאת ברזל מגביל אותה מלמטה. מים המומסים בהתכה מרפים את המבנה שלה ומקלים על זרימתה, ולכן התכה עשירה במים אינה יכולה להיות סמיכה מדי. אבל התכה דלילה מדי מניחה לברזל הצפוף לשקוע ממנה במקום לשאת אותו כלפי מעלה, כפי שנוזל דליל מניח לגרגרים כבדים לשקוע ואילו נוזל סמיך מחזיק אותם. ההתכה הפעילה של פתח נמצאת בין שני הגבולות האלה.

H.2 חומרים נדיפים

חומרים נדיפים הם חומרים שעוברים בקלות למצב גז, ובראשם המים. המערכת המוקדמת הייתה עשירה בחומרים נדיפים. הם מקלים את ההתכה, מרחיבים אותה ומורידים את צמיגותה, והם מניעים את החומר החוצה מן הימות שבנו את שוליהם (F.3§). התכה שנושאת גז מומס קלה יותר מאותה התכה בלעדיו, וכשהיא עולה

והלחץ עליה יורד, הגז יוצא מן התמיסה ומנפח אותה, כפי שבקבוק סודה מקציף כשפותחים אותו. הדבר גם מרים את ההתכה וגם זורק אותה החוצה.

הימות לא היו זהים בכך: הימות העשירים בחומרים נדיפים התיזו יותר, והימות העשירים בחומר קל זרקו אותו רחוק בשלב מוקדם, לפני שהצמיגות עלתה (J.2§). ההבדל הזה בין הימות חוזר בכימיה של הקרקע שסביבם, שחלק נ קורא טבעת אחר טבעת.

מומחה יטען שפנים הירח ידוע כיבש. פנים הירח נקרא היום יבש; זה מתאר את הירח אחרי שהחומרים הנדיפים עזבו, לא בזמן הבנייה. הדגימות מודדות את המצב שנותר לאחר שהגז נמלט דרך הפתחים; המנוע פעל לפני כן, כשהחומרים הנדיפים עוד היו שם.

H.3 שטף, דעיכה והשטף הקריטי

השטף Q הוא המסה שעוברת דרך פתח ביחידת זמן. מה שפתח העביר במשך חייו הוא $M = \int Q dt$: השטף מסוכם לאורך כל הזמן שבו הפתח היה פעיל, מן הזרימה הראשונה ועד לאטימה. חלק ממנו נשאר בגוף וחלק נזרק,

$$Q_{\text{feed}} = Q_{\text{retained}} + Q_{\text{erupted}},$$

כלומר השטף שהזין את הפתח שווה לחלק שנשאר בגוף, שבנה את פניו, ועוד החלק שהתפרץ החוצה מן הפתח. רק החלק שנזרק יצר מכתשים של חומר חוזר. הדבר חשוב לקריאת המכתשים: מספר המכתשים סביב ים מודד את מה שהוא זרק, לא את כל מה שעבר דרכו.

פתח נאטם כשהשטף יורד מתחת לרמה שבה החום שהוא מביא כבר אינו מאזן את ההתקררות. ברז שנשאר פתוח בלילה של כפור הוא תמונה טובה: כל עוד המים זורמים בחוזקה, החום שהם נושאים שומר על הצינור פתוח; כשהזרימה יורדת לטפטוף, הקור גובר והצינור קופא וננעל. רמת הזרימה שבה שני אלה מתאזנים היא השטף הקריטי. השטף הקריטי זמני האטימה דורשים את זמן ההעברה, את קוטר הפתח, את קצב העלייה, את צמיגות ההתכה, את הקצב שבו המגע הצטמצם ואת ההיסטוריה התרמית של הכיפה; הם מפורטים כדרישה בחלק M.

H.4 חום כדור הארץ

כל עוד הגוף היה מחובר, הצד הקרוב פנה אל כדור הארץ החם. קרינה מכדור ארץ בטמפרטורה של כ-2,000 K, במקדם צפייה של 0.205, מחזיקה את פני השטח של הצד הקרוב סביב 1,345 K, מעל הסולידוס: הצד הקרוב לא יכול היה לקפוא כל עוד היה מחובר, והפתחים שלו נשארו פתוחים.

שלושה מונחים נושאים את התוצאה הזו. מקדם הצפייה הוא החלק מן הקרינה היוצאת ממשטח שמגיע אל גוף נתון — במילים פשוטות, כמה מן השמים הגוף הזה ממלא כשמביטים מן המשטח. מקדם צפייה של 0.205 פירושו שמן הצד הקרוב מילא כדור הארץ כחמישית מן השמים. משטח שקולט את הקרינה הזו ופולט אותה שוב מתייצב במקום שבו מה שהוא פולט שווה למה שהוא קולט; כשחמישית מן השמים מלאה בגוף בטמפרטורה של כ-2,000 K, זה בערך $1\,345 \approx 2\,000 \text{ K} \times 0.205^{1/4}$. הסולידוס הוא הטמפרטורה שמתחתיה חומר מוצק כולו; לבזלת של הימות הוא כ-1,050 מעלות צלזיוס (G.3§), קרוב ל-1,320 K. פני השטח של הצד הקרוב הוחזקו מעליו. הם לא יכלו ליצור מכסה מוצק יציב, והפתחים שמתחתם לא יכלו להיאטם.

הצד הרחוק פנה הרחק מכדור הארץ. ככל שהאגס גדל, הגיע אליו פחות ופחות מחום כדור הארץ; הוא הקרין אל החלל וקפא. רוב הפתחים שלו נאטמו בזה אחר זה ויצרו כיפה סגורה שהלחץ דחף אותה; Moscoviense, שהוזן מ-Serenitatis דרך מעבר פנימי ישר, נשאר פעיל זמן רב אחריהם. אסימטריה אחת של חום יוצרת את הפה, את האטימה, את הימות הכהים ואת הבדלי הגילים: הצד הקרוב, שכדור הארץ שמר אותו חם, שמר על הפתחים

שלו כפיות וכיציאות, מעברים של הלחץ של כדור הארץ, עד השחרור; רוב הצד הרחוק אטם את הפתחים שלו מוקדם; הימות של הצד הקרוב נשארו נוזליים עד הסוף, ואחרי השחרור קפאו לאט, מבחוץ פנימה, למישורים הכהים הגדולים הנראים היום; ושני הצדדים קפאו בזמנים שונים, ולכן פני השטח שלהם נושאים גילים שונים.

מה יש בידינו עכשיו. פתח פעל כל עוד הוזנה דרכו, בלחץ ובציפה, התכה נוזלית שהוקלה על ידי חומרים נדיפים ושצמיגותה מתאימה, וכל עוד החום שהביא איזן את התקררותו. בצד הקרוב קרינת כדור הארץ הוציאה את ההתקררות מן המאזן כל עוד הגוף היה מחובר. חלק I מוסיף את התנאי השני: פתח יכול היה לזרוק החוצה רק לאחר שנחשף.

חלק I — הגאומטריה של החשיפה, והדורות

הבניה

הפתחים לא נחשפו כולם בבת אחת. **הגישה:** נסיגת המגע נבחנת כשעון, והפתחים ממוינים לפי המועד שבו נחשפו ולפי מה שעשו בכל שלב.

חלק H הציג מה החזיק פתח פעיל. חלק זה מוסיף היכן ומתי כל פתח יכול היה לפעול כיציאה. הגוף ישב על קצה האגס של כדור הארץ (B.1§) בשלושה חלקים. המגע היה הדסקה של הכיפה התחתונה שנגעה בקצה ונשארה מחוברת עד הסוף, ברוב 3,000 ק"מ ברגע השחרור. סביבו שכבה הטבעת של הכיפה התחתונה, שישבה על הקצה כל עוד הקצה היה ברוב 6,000 ק"מ, והתקלפה ממנו ככל שהמגע הצטמצם. מעל שניהם עמדה הכיפה העליונה, שפנתה הרחק מכדור הארץ והייתה פתוחה לחלל מן ההתחלה. פתח מתחת למגע היה מכוסה על ידי כדור הארץ ויכול היה רק להעביר חומר אל תוך הגוף; פתח שהיה פתוח לחלל יכול היה לזרוק חומר החוצה. ככל שהמגע הצטמצם, פתחים עברו מן המצב הראשון לשני. כשהגוף התעגל, כל חלק שמר על חלקו בפני השטח, ושלושת החלקים הפכו לשלושה אזורים סביב מרכז הצד הקרוב: המגע — כיפה של כ-31° בצד הקרוב; הטבעת — חגורה מ-31° עד 70°; והכיפה העליונה — הצד הרחוק שמעבר לה (B.3§; מאמר 3, B.4§). בקטלוג של נספח A אותו סדר נישא על ידי האזורים של מאמר 3: המגע, הגבעה שסביבו המגיעה לעבר שולי הדיסקה הנראית, ומעבר לה, בצד הרחוק.

I.1 חזית החשיפה הנעה

כשקצה האגס הצטמצם מ-6,000 ל-3,000 ק"מ, המגע נסוג, והקליפה נחשפה מבחוץ פנימה. האזורים החיצוניים נחשפו ראשונים; המגע האחרון נשאר מכוסה עד השחרור. לכן שפת המגע היא חזית שנעה פנימה על פני הקליפה, וכל פתח נחשף ברגע שהחזית עברה מעליו.

הגאומטריה עצמה יוצרת שעון. פתח רחוק ממרכז המגע נחשף מוקדם; פתח קרוב למרכז — מאוחר. מרחקו מן המרכז הוא קריאה של מועד חשיפתו, בלי שנים. הבנייה כולה, מתחילת הבליטה ועד השחרור לפני 3.873 מיליארד שנה, נמשכה כ-600 מיליון שנה (בערך 400 לבליטה ולאגס, 100 לפחיסות ו-100 עד השחרור); שעון החשיפה מסדר את הפתחים בתוך הזמן הזה, בלי לקבוע את תאריכיהם.

תמונה מבהירה זאת: כדורגל מרוקן, שחציו מונח על הרצפה, מתנפח ומתעגל, ומספר הפאות שלו שנוגעות ברצפה יורד. הפאות אינן משתנות; מה שיורד הוא כמה מהן נוגעות בכדור הארץ בזמן, ורק פאה שנמצאת במגע יכולה להיות פה. בתמונה הפאות הן הפתחים והרצפה היא כדור הארץ. הפאות שמתרוממות מן הרצפה ראשונות הן אלה שבשפת כתם המגע; הפאה שבמרכז הכתם היא האחרונה לעזוב אותו.

I.2 מפה מכוסה ליציאה חשופה

פתח מתחת למגע הזין את הגוף פנימה כל עוד היה מכוסה. כשהחזית עברה מעליו, אותו מסלול עצמו נחשף והחל לזרוק החוצה. במונחים של A.1§, הוא התחיל כפה, שדרכו עבר חומר בעודו מכוסה, וסיים כיציאה, שזרקה חומר החוצה. הים הנראה היום הוא השלב האחרון של מבנה שחיו התחילו הרבה לפני כן. המבנה הזה בשני המצבים; מה שונה הוא הכיפה שסביבו, פתוחה לחלל או אטומה. הכיפה נאטמת מלמעלה, והפתח שמתחת

ממשיך להעביר חומר מתחתיה. זו הסיבה שאותו פתח יכול לשאת את סימני שני חייו: הזנה עמוקה מן התקופה שבה היה מכוסה, והמכתשים והשוליים מן התקופה שבה היה חשוף.

I.3 חשיפה הדרגתית בתוך ים אחד

ים גדול שחצה את החזית נחשף מצד אחד לצד השני, $t_{\text{exp}} = t_{\text{exp}}(x)$: זמן החשיפה t_{exp} אינו ערך אחד לכל הים, אלא משתנה עם המיקום x לרוחבו — הצד החיצוני ראשון והצד הפנימי אחרון. אם התייעוד שומר זאת, צריך להופיע בתוך הים מפל בכיוון החשיפה: בשימור המכתשים, במילוי או במבנה. לצד שנחשף ראשון היה זמן רב יותר לזרוק חומר ולצבור מכתשים. המבחן מוצג בחלק M.

I.4 שלושה דורות

הפתחים מתחלקים לשלושה דורות לפי היסטוריית החשיפה שלהם, לא לפי גיל הבזלת שלהם. ההבדל חשוב: הבזלת היא רק פני השטח האחרונים של פתח, והיא יכולה להיות צעירה מעל פתח שפעל זמן רב, ולכן גילה מתארך את סוף חייו של הפתח, לא את חייו. דור I: פתחים על פני הכיפה, בצד הרחוק, חשופים מן ההתחלה וזורקים החוצה. דור II: פתחים בחגורה, שנחשפו בזמן ההתעגלות, תחילה פיות ואחר כך יציאות. דור III: פתחים בדסקת המגע, שנחשפו רק לקראת השחרור — הפיות האחרונים. בלשונו של המחבר: *הימות הם פתחי יציאה; חלקם יציאות של ממש, וחלקם פיות שדרכם עבר חומר אל היציאות, ושנחשפו עם הזמן.*

דור	על הגוף	על הירח היום	חיי הפתח
I	הכיפה העליונה, פתוחה לחלל	מעבר ל-70°; בנספח A, מעבר לגבעה: הצד הרחוק	חשוף מן ההתחלה; זרק החוצה; נאטם מוקדם, רבים קבורים היום (D.4§)
II	הטבעת של הכיפה התחתונה: החגורה	החגורה, 31°–70°; בנספח A, הגבעה, לעבר שולי הדיסקה	נחשף בזמן ההתעגלות; תחילה פה, אחר כך יציאה
III	דסקת המגע	הכיפה של כ-31° בצד הקרוב; בנספח A, המגע	מכוסה עד סמוך לשחרור; הפיות האחרונים

שלושת הדורות של הפתחים: מקומם על הגוף, מקומם על הירח היום וחיי הפתח.

הטבלה נקראת מלמעלה למטה כסדר החשיפה, שעובר מבחוץ פנימה: הצבע עובר מן הצד הרחוק, שנחשף ראשון, אל המגע, שנחשף אחרון. האזורים של היום הולכים לפי נספח A, שבו כל ים ממוקם באזור ובדור שלו לפי הגאומטריה של מאמר 3.

I.5 מה עשו הימות בכל שלב

הבנייה התקדמה בשלבים (B.1§): ההתעגלות החוצה, כשהגוף שישב על הקצה הפך לכדור; הפחיסות; ההתעגלות פנימה, כשהפחיסות התרפתה; אחר כך השחרור, והזמן שאחריו. הטבלה עוקבת אחרי הימות לאורך השלבים.

שלב	מה עשו הימות
התעגלות החוצה	הפתחים הראשונים, על הקליפה השטוחה, זרקו חומר; המכתשים שכבר היו על פני השטח השתנו יחד איתה
פחיסות	הימות פעלו במלוא העוצמה; רוב המכתשים נוצרו, והגדולים שבהם

הימות נרגעו; רוב הפתחים של הצד הרחוק נאטמו, כשהאגס גדל ופחות מחום כדור הארץ הגיע אליהם, ויצרו כיפה סגורה שהלחץ דחף אותה (Moscoviense, שהוזן מ-Serenitatis, נשאר פעיל); פתחי השוליים המשיכו להשליך	התעגלות פנימה
הלחץ של כדור הארץ הפסיק להגיע אל הירח, והפליטות פסקו; הימות של הצד הקרוב, חמים ובעלי צמיגות נמוכה, החלו לקפוא לאט מבחוץ פנימה; קרקעיותיהם חלקות	שחרור
אף פתח של הירח לא השליך עוד; הימות של הצד הקרוב קפאו במשך מאות מיליוני שנים עד 1–2 מיליארד; את המכתשים הקטנים יצרו טיפות שכדור הארץ המשיך לזרוק ונמשכו אל הירח (F.5–F.6§§)	אחרי השחרור

מה עשו הימות בכל אחד משלבי הבנייה ואחריה.

השורות המודגשות מסמנות את שתי נקודות המפנה: הפחיסות, כשהימות זרקו הכי הרבה ונוצרו המכתשים הגדולים ביותר, והשחרור, כשהלחץ של כדור הארץ הפסיק להגיע אל הירח. רוב הצד הרחוק נאטם ראשון, כשהגוף עוד היה מחובר, כשהאגס גדל ופחות מחום כדור הארץ הגיע אליו (H.4§); בשחרור פסקו הפליטות בכל מקום, והימות של הצד הקרוב, שלא הוזנו עוד, קפאו לאט אחר כך.

מדוע הקרקעיות של הצד הקרוב חלקות. בשחרור הן היו חמות ובעלות צמיגות נמוכה, והן קפאו לאט, מבחוץ פנימה, כפי שאגם קופא; הן שמרו רק את מה שנפל אחרי שקפאו. על קרקעית Mare Imbrium מונחים 10 מכתשים של 20 ק"מ ומעלה על פני 871,000 קמ"ר (כל הבזלת הקרויה Imbrium במפת LROC, ולא רק הרצפה שמעל ליבת הכיפה שלו, 345,584 קמ"ר ב-F.5§) — 11 למיליון קמ"ר; על 16 Serenitatis, לעומת 205 על הרמות (207 במאמר 6, D.2§, על שטח רמות שונה מעט) — בערך פי שלושה-עשר עד פי שמונה-עשר פחות (205/16 עד 205/11). Procellarum, מישור בזלת ולא ים, נושא 27; גרסה קודמת מנתה אותו עם הימות וגרסה "פי שמונה עד שמונה-עשר" (205/27 עד 205/11), ולפניה "פי שלושה עד שמונה-עשר". צפיפות למיליון קמ"ר מאפשרת להשוות משטחים בגדלים שונים: זה מספר המכתשים שמשטח בשטח הזה היה נושא. הרמות, שקפאו מוקדם, שמרו את המכתשים של הבנייה כולה; הקרקעיות של הצד הקרוב שמרו רק את מה שנפל אחרי שקפאו. הספירה כוללת מכתשים שהותכו לתוך הבזלת ונראים רק כטבעות, כך שהמספר שנוצר אחרי שהקרקעית קפאה קטן עוד יותר.

I.6 גודל הפתח זיכרון

פתח שהזין זמן רב תחת כיסוי, בחום ובלחץ, יכול להיות רחב יותר מפתח שנחשף והתקרר מוקדם: זרימה חמה מרחיבה את דרכה, כפי שמים זורמים מרחיבים תעלה בקרח. התחזית היא שהקוטר מסודר לפי משך ההזנה, $D = F(\text{history of feeding}, P, T, Q, \eta)$. במילים: הקוטר D של פתח הוא פונקציה של משך ההזנה ואופייה, של הלחץ P , של הטמפרטורה T , של השטף Q ושל הצמיגות η של ההתכה שלו; גודלו של פתח הוא זיכרון של הזנתו. כשקוראים זאת על הקטלוג של נספח A, הפתחים של הצד הקרוב הם הגדולים יותר, ליד מקור החום: שש כיפות ההזנה הגדולות ביותר, ברוחב 450–909 ק"מ, כולן בצד הקרוב, והקוטר החציוני הוא 375 ק"מ שם לעומת 227 ק"מ בצד הרחוק, שבו הגדולה ביותר היא Orientale, 435 ק"מ (גרסה קודמת גרסה "הפתחים של 200–1,200 ק"מ נמצאים כמעט כולם בצד הקרוב"; בצד הרחוק 11 מתוך 18 כיפות הן בנות 200 ק"מ ויותר).

התנאי שקושר את הגאומטריה אל המנוע הוא שפתח חייב להיות עדיין פעיל כשהוא נחשף:

$$t_{\text{shutdown}} \geq t_{\text{exp}}$$

כאן t_{shutdown} הוא הזמן שבו הפתח נאטם (חלק H) ו- t_{exp} הוא הזמן שבו חזית החשיפה הגיעה אליו (I.1§). המנוע קובע את הראשון, הגאומטריה את השני. פה שנאטם לפני שהחזית הגיעה אליו לא הפך לעולם ליציאה. פה כזה לא זרק דבר החוצה ולא השאיר שדה של מכתשי חומר חוזר, ככל שהעביר בזמן שהיה מכוסה.

מה יש בידינו עכשיו. הפתחים נחשפו בסדר שנקבע על ידי המגע המצטמצם: הצד הרחוק ראשון, החגורה אחריו, המגע אחרון. כל פתח היה פה כל עוד היה מכוסה, והפך ליציאה כשנחשף — בתנאי שעדיין היה פעיל. רוב הצד הרחוק נאטם מוקדם, כשהאגס גדל ופחות מחום כדור הארץ הגיע אליו (Moscoviense היוצא מן הכלל); בשחרור פסקו הפליטות, והקרקעיות החלקות של הצד הקרוב מתעדות שהן קפאו אחריו, לאט, מבחוץ פנימה. חלק J קורא את אותה היסטוריה בכימיה של הקרקע.

חלק J — כימיה

הבעיה

הימות נושאים את ההיסטוריה שלהם ביסודות שלהם. הגישה: נקראים בזה אחר זה הברזל והטיטניום סביב הימות, התוריום מול אזורי הבנייה, והיסודות הסידרופיליים של האגנים.

חלקים H ו-I עקבו אחרי הפתחים בזמן: כיצד פעלו, ומתי כל אחד נחשף ונאטם. חלק זה קורא את אותה היסטוריה ביסודות של פני השטח, כפי שהם ממופים ממסלול. שלושה סוגי יסודות נושאים אותה, וכל אחד מהם מספר דבר אחר.

יסוד	מה הוא מסמן	מה הוא מספר כאן
ברזל וטיטניום (FeO, TiO ₂)	החומר של הימות, שעשיר בשניהם	עד כמה רחוק כל ים זרק את החומר שלו, ומתי נאטם (J.1–J.2§)
תוריום	הנוזל האחרון של התכה מתקררת, ששומר אותו	היכן הירח נגע אחרון בכדור הארץ, ולכן הלך הנוזל האחרון (J.3–J.6§)
יסודות סידרופיליים	מתכת מבחוץ, שנושאת אותם	האם גוף זר השאיר את מסתו באגנים (J.7§)

שלושת סוגי היסודות שחלק זה קורא, ומה כל אחד מהם מספר.

ברזל וטיטניום ניתנים כמשקל התחמוצות שלהם, FeO ו-TiO₂, באחוזים ממשקל הקרקע (אחוזי משקל, %wt): FeO 6.9 wt% פירושו 6.9 גרם תחמוצת ברזל בכל 100 גרם של חומר פני השטח. תוריום נדיר הרבה יותר, והוא ניתן בחלקים למיליון (ppm) — גרמים בטון.

J.1 טבעות של ברזל וטיטניום

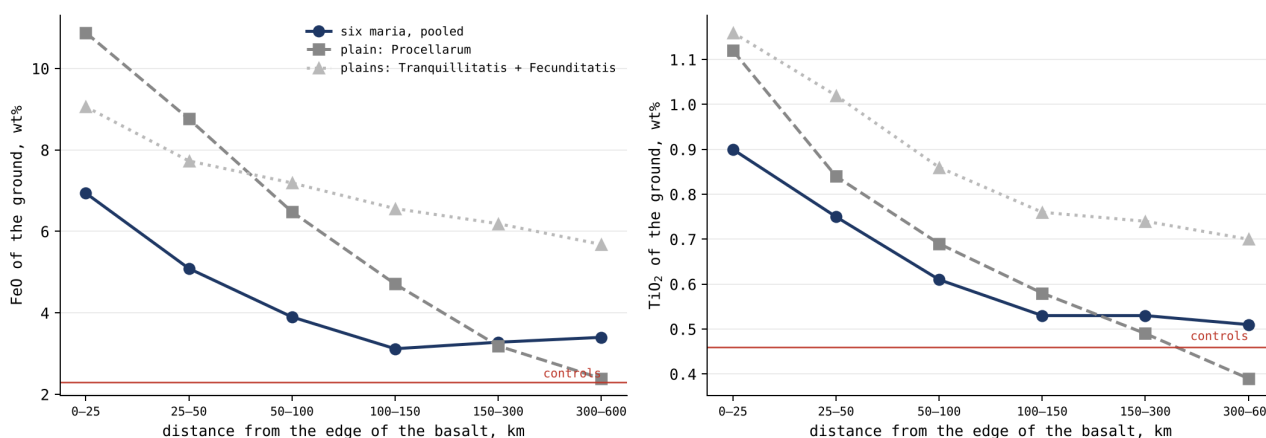
אם הימות הם המקור של החומר החוזר (B.2§), הקרקע סביב כל ים צריכה לשאת את החומר שלו — הרבה ממנו בסמוך אליו ופחות ככל שמתרחקים. שאלת הסעיף היא כיצד החומר הזה יורד עם המרחק. כל ים מוקף בטבעות: רצועות קרקע במרחק קבוע ממנו, 0–25 ק"מ, 25–50 ק"מ וכך החוצה עד 300–600 ק"מ. הקרקע נקראת סביב מכתשים קטנים של 5–60 ק"מ שנבחרו בכל טבעת, במרחק של 3–4 רדיוסי מכתש ממרכז כל מכתש, וכל פיקסל של בזלת מוסר, כך שמה שנמדד הוא היבשה שסביב הים ולא לבה שהתפשטה עליה.

בקרקע שבמרחק 3–4 רדיוסים סביב כל מכתש, כשפיקסלי הבזלת מוסרים, הברזל והטיטניום הם הגבוהים ביותר בטבעת הקרובה ויורדים כלפי חוץ. סביב ששת הימות, במיוחד, הברזל יורד מ-6.9 wt% ב-0–25 ק"מ ל-3.1 ב-100–150 ק"מ, ואז נשאר ב-3.3–3.4 עד 600 ק"מ, והטיטניום יורד מ-0.90 ל-0.51; בקבוצות הביקורת הערכים הם 2.3 ו-0.46. קבוצות הביקורת הן קרקע במרחק של יותר מ-600 ק"מ מכל אחד מהם — הרמה של הרמות במקום שאליו שום ים לא הגיע. הברזל בסמוך לימות הוא פי שלושה מן הרמה הזו, ואפילו ב-300–600 ק"מ הוא נשאר גבוה ממנה בחצי. סביב המישור של Procellarum הברזל יורד מ-10.9 ל-2.4 wt%, רמת הביקורת, ב-300–600 ק"מ.

300–600	150–300	100–150	50–100	25–50	0–25 ק"מ	FeO/TiO ₂ , %wt
הימות						
3.5/0.62	3.4/0.57	3.2/0.64	3.6/0.72	5.8/0.92	7.8/1.25	Smythii
—	—	—	9.6/0.78	9.8/0.97	10.8/1.07	Imbrium
—	—	—	6.7/0.68	7.0/0.67	8.0/1.31	Serenitatis
3.4/0.43	4.4/0.43	4.0/0.49	4.2/0.53	4.1/0.60	4.7/0.72	Crisium
2.3/0.46	2.1/0.48	1.9/0.47	2.4/0.48	3.2/0.61	7.3/1.00	Moscoviense
6.0/0.67	4.5/0.65	4.1/0.65	4.1/0.72	4.6/0.79	5.2/0.84	Nectaris
3.4/0.51	3.3/0.53	3.1/0.53	3.9/0.61	5.1/0.75	6.9/0.90	ששת הימות במאוחד
המישורים						
4.5/0.78	5.0/0.81	5.8/0.84	6.8/1.03	7.7/1.12	8.6/1.24	Tranquillitatis
6.3/0.64	6.4/0.73	6.8/0.74	7.3/0.83	7.9/0.93	9.4/1.12	Fecunditatis
2.4/0.39	3.2/0.49	4.7/0.58	6.5/0.69	8.8/0.84	10.9/1.12	Procellarum
2.3/0.46						ביקורת, מעבר ל-600 ק"מ

ברזל וטיטניום (%FeO/TiO₂, wt) בטבעות סביב ששת הימות ושלושת המישורים, כשפיקסלי הבזלת מוסרים, מול קבוצות הביקורת.

כל תא נותן ברזל וטיטניום, FeO/TiO₂, בטבעת של העמודה שלו. הטבלה נקראת לאורך כל שורה, מן הטבעת הקרובה ועד הרחוקה ביותר: בכל שורה הערכים יורדים כלפי חוץ. השורה המודגשת, ששת הימות במאוחד, היא התוצאה העיקרית; יש לקרוא אותה מול השורה האחרונה, קבוצות הביקורת. השורה האפורה, Procellarum, היא המישור שיורד עד רמת הביקורת. הקווים המפרידים מסמנים את הטבעות שלא נקראו סביב Imbrium ו-Serenitatis, שהטבעות הרחוקות שלהן נופלות בין משטחי בזלת אחרים (שלב 7 של מחקר 9).



איור 10. ברזל וטיטניום בטבעות סביב הימות והמישורים, כשפיקסלי הבזלת מוסרים (J.1§).

איור 10 משרטט את אותם ערכים כעקומות מול המרחק. העקומות של הימות יורדות בתלילות על פני 100 הק"מ הראשונים ואחר כך מתיישרות מעל רמת הביקורת; העקומה של Procellarum ממשיכה לרדת עד שהיא פוגשת אותה. ההבדל הזה הוא הנושא של מחקר 9.

המחקר • מחקר 9

STEP 1 הגדרת שאלת המחקר והבעיה

התופעה. הקרקע סביב כל ים עשירה יותר בברזל ובטיטניום מן הרמות הרחוקות. **הפער בידע.** עד כמה רחוק מגיעה החתימה של כל ים, והאם היא יורדת באותו אופן סביב כל ים וסביב המישורים, לא נקרא טבעת אחר טבעת כשהבזלת עצמה מוסרת. **שאלת המחקר:** סביב כל ים, כיצד יורדים הברזל והטיטניום של היבשה עם המרחק, עד כמה רחוק מגיע העודף, ובמה הדבר שונה סביב המישורים?

STEP 2 סקירת ספרות (רקע מדעי)

העודף נקרא בספרות כחומר של הים שהועבר הצידה אל הרמות על ידי היווצרות מכתשים מאוחרת יותר, למרחק של קילומטרים אחדים עד כמה עשרות קילומטרים [S18]. בקריאה הזו כל מכתש מאוחר זורק מעט מן הים למרחק קצר, וזריקות רבות כאלה מפזרות אותו. הברזל והטיטניום נקראים מ-Kaguya [S3], חללית יפנית שמיפתה אותם על פני הירח כולו. **מה חדש כאן:** שישה ימות ושלושה מישורים, כל אחד נקרא בשש טבעות עד 600 ק"מ, כשפיקסלי הבזלת מוסרים, מול קבוצות ביקורת רחוקות מכל בזלת.

STEP 3 ניסוח השערת המחקר

כל ים זרק את החומר שלו סביבו — את החומר הקל והנוזלי ראשון ולמרחק, ואת הכבד מאוחר יותר ובסמוך; לכן סביב כל ים הברזל והטיטניום יורדים עם המרחק, והעודף מגיע הרבה מעבר לטווח של ערבוב צידי. מישור לא זרק דבר ורק שפך את ההתכה שלו לצדו, ולכן העודף לצד מישור יורד לרמת הביקורת בתוך טווח השפיקה שלו. שתי הקריאות נפרדות אפוא בעניין הטווח: ערבוב צידי על ידי מכתשים נעצר בתוך כמה עשרות קילומטרים, ואילו ים שזרק את החומר שלו מגיע למאות.

STEP 4 מערך המחקר (מתודולוגיה)

סוג המחקר: כמותי; ערכים לפי טבעת. **המדגם:** היבשה סביב המכתשים של 5–60 ק"מ ליד שישה ימות (Tranquillitatis, Smythii, Imbrium, Serenitatis, Crisium, Moscoviense, Nectaris) ושלושה מישורים (Fecunditatis, Procellarum); קבוצות ביקורת מעבר ל-600 ק"מ. **הכלים:** המפות של Kaguya ברזולוציה מלאה, מפת הימות של LROC, וקוד שקורא את היבשה במרחק 3–4 רדיוסי מכתש בטבעות של 0–25, 25–50, 50–100, 100–150, 150–300 ו-300–600 ק"מ. מפת הימות של LROC היא קווי המתאר של כל יחידת בזלת שמופתה על ידי המצלמה של Lunar Reconnaissance Orbiter; היא משמשת כאן להסרת פיקסלי הבזלת.

STEP 5 איסוף הנתונים (ביצוע המחקר)

המכתשים נבחרו לפני שנקראה כימיה כלשהי (מחקר 2), כך שהבחירה לא יכלה ללכת אחרי הערכים; היבשה סביב כל אחד מהם נקראה כשפיקסלי הבזלת מוסרים, והוצבה בטבעת שלה. הערכים הם הטבלה של J.1.

STEP 6 ניתוח הנתונים ועיבודם

הימות, במאוחד. הברזל יורד מ-6.9 wt% ב-0–25 ק"מ ל-5.1, 3.9 ו-3.1 ב-100–150 ק"מ, ונשאר ב-3.3 וב-3.4 ב-150–300 וב-300–600 ק"מ, 1.1 wt% מעל רמת הביקורת; הטיטניום יורד מ-0.90 ל-0.51. **ים אחר ים.** סביב Smythii ו-Moscoviense הברזל יורד בחצי בתוך 50–100 ק"מ; סביב Crisium הוא נשאר ב-4 wt% עד 300 ק"מ. **המישורים.** סביב Procellarum, המישור הגדול ביותר, הברזל יורד מ-10.9 ל-2.4 wt%, רמת הביקורת, ב-300–600 ק"מ; סביב Tranquillitatis ו-Fecunditatis הוא נשאר גבוה, 4.5 ו-6.3 wt%, ב-300–600 ק"מ, שם הקרקע נמצאת בין משטחי בזלת אחרים. **היוצאים מן הכלל.** מדרום-מערב ל-Nectaris הברזל עולה שוב מעבר ל-150

ק"מ, לעבר הרמות הדרומיות העשירות בברזל, בעוד הטיטניום שלו נשאר שטוח; סביב Moscoviense הטבעת מגיעה לרמה של הצד הרחוק בתוך 100 ק"מ.

STEP 7 הסקת מסקנות וכתיבת הדוח

תוצאה. ההשערה נתמכת: סביב כל ים החתימה שלו יורדת עם המרחק, והעודף של הימות נשמר עד 600 ק"מ; לצד המישור הגדול ביותר העודף יורד לרמת הביקורת — הטווח של שפיכה. עודף שנשמר עד 600 ק"מ הוא פי עשרה ויותר מן הטווח של ערבוב צידי על ידי מכתשים מאוחרים; זה הטווח של ים שזרק את החומר שלו. **מגבלות.** הטבעות הרחוקות של ימות ומישורים שכנים חופפות, ושני המישורים הקטנים נמצאים בין בזלת אחרת; היוצאים מן הכלל מוסברים על ידי היבשה שמעבר להם, ולא נבדקו; הטבעות קוראות את פני השטח, לא את העומק. **כיוונים למחקר המשך.** קריאת הטבעות רק בצד של כל ים ומישור הפונה הרחק מבזלת אחרת; מודל של המרחק שאליו נופל חומר שנזרק מים, לפי גודל ומהירות, מול הירידה הנמדדת.

J.2 הכרונולוגיה של הברזל

הטבעות של J.1§ נושאות גם שעון. הברזל של הקרקע מתעד מתי כל ים נאטם. ים נאטם במצב של כ-17% FeO; הקרקע הרחוקה ממנו נאטמה נמוך, והקרקע הקרובה אליו — גבוהה. במילים פשוטות: מה שים זרק מוקדם נחת רחוק והיה דל בברזל; מה שזרק מאוחר נחת קרוב והיה עשיר; ומה שהחזיק כשנאטם, כ-17% FeO, הוא הברזל של הים עצמו. הימות העשירים בברזל נאטמו מאוחר, והימות הדלים בברזל — מוקדם.

החומר הקל, הדל בברזל והעשיר בחומרים נדיפים, זרם בתחילה למרחק; כשהים התרכז, צמיגותו עלתה והחומר שלו זרם למרחקים קצרים יותר, ולכן הברזל הגבוה ביותר הוא בשפה. זה אותו מנוע כמו בחלק H, כשהוא נקרא מתוך תוצריו: בתחילה החומרים הנדיפים שמרו על ההתכה דלילה וקלה וזרקו אותה רחוק (H.2§); כשהם עזבו, ההתכה נעשתה כבדה יותר, עשירה יותר בברזל וסמיכה יותר, והיא נחתה קרוב. הירידה של הברזל עם המרחק היא התייעוד של השינוי הזה.

J.3 התוריום מוחזק על ידי המגע

תוריום הוא יסוד רדיואקטיבי שאינו נכנס לגבישים שגדלים כשהתכה מתקררת; הוא נשאר בנוזל ומתרכז באחרון שבו (J.4§). במקום שבו הוא מרוכז, התרכז הנוזל האחרון של התכה כלשהי. שאלת הסעיף היא היכן על הירח זה קורה, והאם זה המגע, האזור שנגע אחרון בכדור הארץ, שנקבע במאמר 3 לפני שהתוריום נקרא.

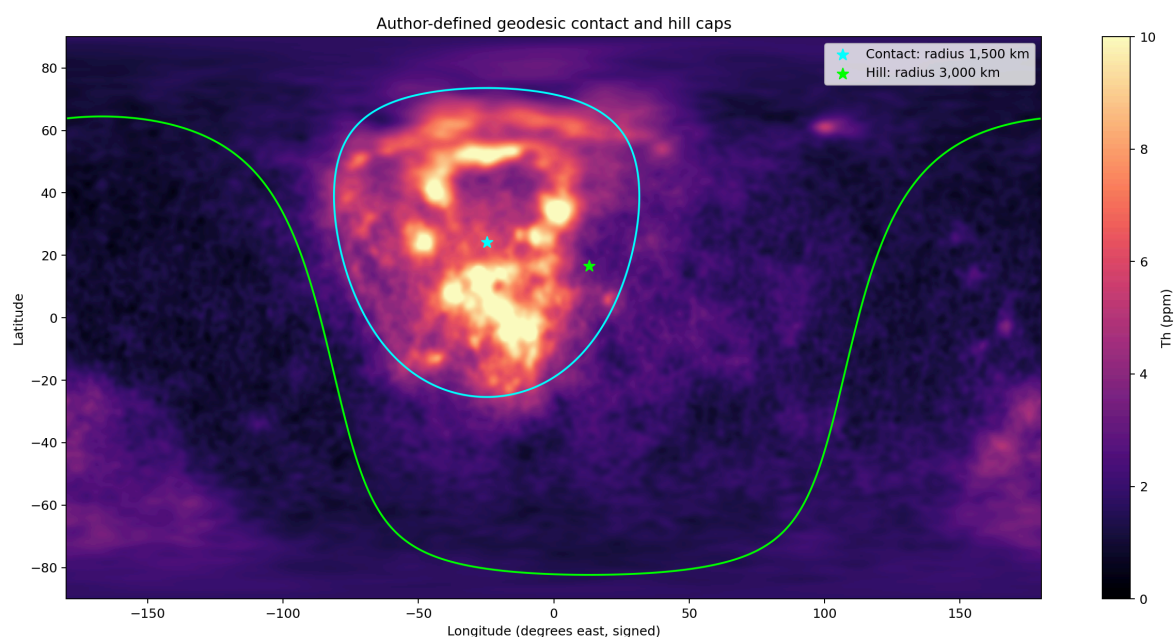
אזור	שטח	ppm עודף התוריום מעל 3	חציון התוריום
המגע, רדיוס 1,500 ק"מ	17.5%	95.0%	5.39 ppm
הגבעה, רדיוס 3,000 ק"מ	57.8%	98.4%	—
מחוץ למגע	82.5%	5.0%	1.52 ppm

חלקו של כל אזור בפני השטח של הירח, מול חלקו בעודף התוריום מעל 3 ppm, וחציון התוריום בו.

הטבלה מעמידה את חלקו של כל אזור בפני השטח של הירח (שטח) מול החלק מעודף התוריום של הירח שהוא מחזיק. יש לקרוא את שתי העמודות זו לצד זו: אילו התוריום היה מפוזר באופן אחיד, כל אזור היה מחזיק את החלק של שטחו. המגע מחזיק יותר מפי חמישה מחלקו; הקרקע שמחוצה לו, ארבע חמישיות מפני השטח, מחזיקה עשרים אחד. הצבע מעמיק לעבר האזור שמחזיק הכי הרבה.

דסקת המגע, שיטת מפני השטח, מחזיקה 95% מן התוריום של הירח שמעל 3 ppm, ו-78% מן השטח שבו התוריום עולה על 3 ppm. התוריום נמדד ממסלול באמצעות קרני הגמא שהדעיכה שלו פולטת, ו-Lunar Prospector מיפה אותו על פני הירח כולו בתאים של חצי מעלה [S4]. העודף מעל 3 ppm הוא החלק של

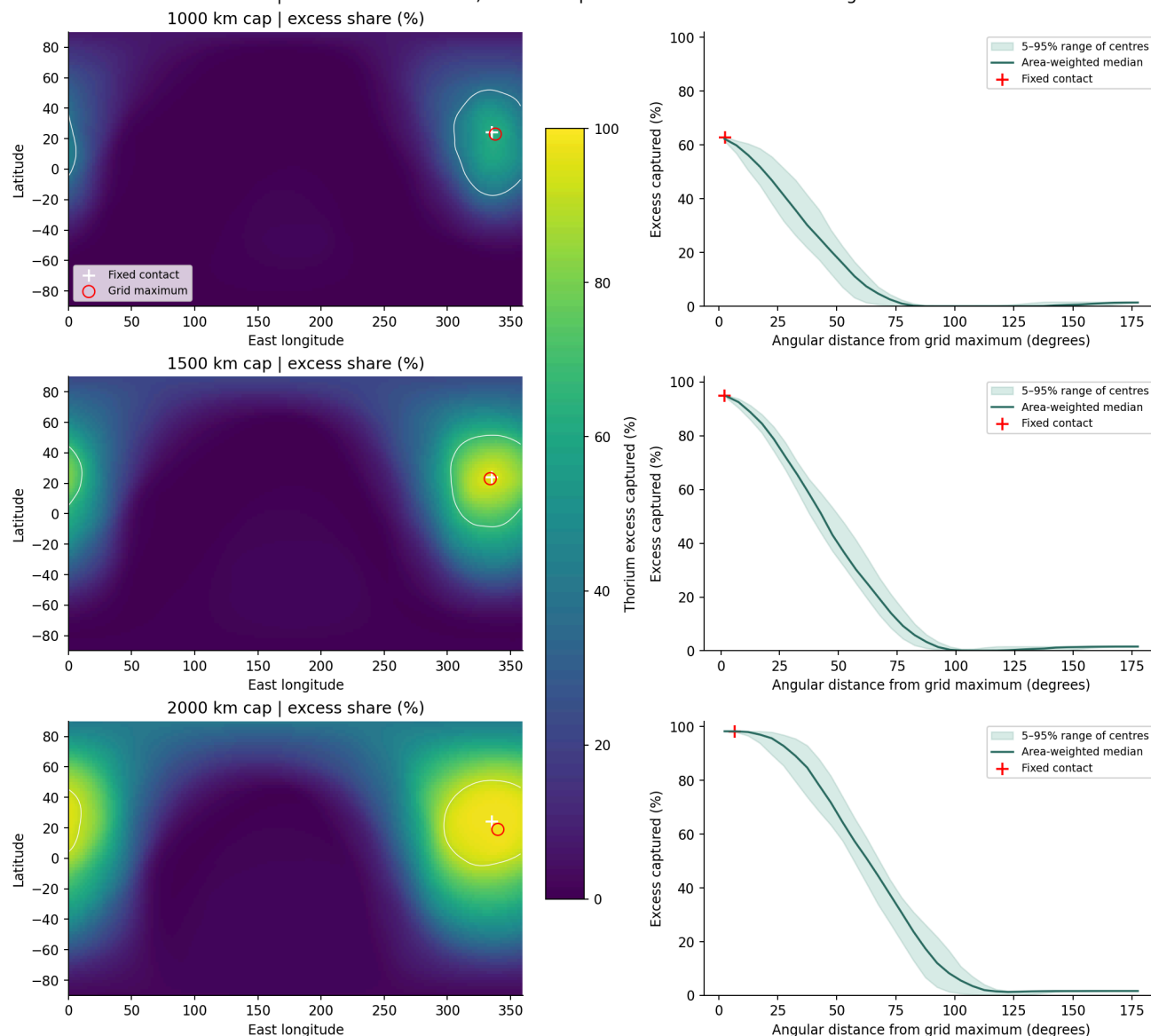
התוריום שעולה על הרמה הרגילה של הרמות; זה הגודל שמספר היכן התוריום התרכז. החציון — הערך האמצעי כשכל התאים של אזור מדורגים — הוא 5.39 ppm בתוך המגע לעומת 1.52 ppm מחוצה לו, פי שלושה וחצי.



איור 11. התוריום של [S4] Lunar Prospector עם המגע (תכלת, רדיוס 1,500 ק"מ) והגבעה (ירוק, רדיוס 3,000 ק"מ) של מאמר 3 (J.38).

איור 11 מראה את המפה: התוריום הבהיר של מערב הצד הקרוב נמצא בתוך עיגול התכלת של המגע, וכמעט דבר ממנו אינו נמצא מחוץ לעיגול הירוק של הגבעה.

האם המגע הוא מקום המקסימום, או רק קרוב אליו? כיפה של 1,500 ק"מ שתוצב בכל מקום בצד הקרוב, ממערב למרכז, תתפוס חלק גדול מן התוריום. מומחה יאמר בצדק שהחזקת רוב התוריום אינה מראה שהמגע הוא המרכז שלו. לכן המבחן הוא להזיז את אותה כיפה על פני הירח כולו ולראות היכן היא תופסת הכי הרבה. הכיפה מורכזה בזו אחר זו על 16,200 נקודות, כל 2° בקו רוחב ובקו אורך, ובכל אחת חושב החלק של עודף הירח שבתוכה. המבחן דומה למטרה שמשורטטת על מפה לפני שהנתונים נפתחים, ואחר כך מושווית לכל מקום אחר שבו אותה מטרה יכלה להיות משורטטת. הנקודה הטובה ביותר נמצאת ב-23° צפון, 334° מזרח, ותופסת 95.14%; מרכז המגע של מאמר 3, 24.1° צפון, 335.2° מזרח, תופס 94.99%. הוא נמצא 1.6° (47 ק"מ) מן הנקודה הטובה ביותר ומדורג שלישי מתוך 16,200: רק שניים מכל המרכזים האפשריים טובים ממנו, ובפחות מחמישית האחוז של העודף. בכיפות של 1,000 ו-2,000 ק"מ הוא מדורג חמישי ותשעה-עשר; בכל גודל הוא נמצא בתוך 0.2% העליונים של כל המרכזים. לכן התוצאה אינה תלויה בגודל שנבחר לכיפה. כשמזיזים את הכיפה הרחק מן המגע, החלק יורד בהתמדה: מתחת לחצי בכ-50° ממנו, ולאפס בצד הרחוק (איור 12).



איור 12. החלק של עודף התוריום של הירח מעל 3 ppm שנתפס על ידי כיפה של 1,500, 1,000, ו-2,000 ק"מ שמרכזו בכל אחת מ-16,200 נקודות (משמאל), וירידתו עם המרחק מן הנקודה הטובה ביותר (מימין). צלב: מרכז המגע שנקבע במאמר 3; עיגול: נקודת הרשת הטובה ביותר; קו מתאר לבן: 5% העליונים של המרכזים. תוריום של Lunar Prospector בתאים של חצי מעלה [S4].

בלוחות השמאליים של איור 12 כל נקודה של הירח צבועה לפי החלק שכיפה שמרכזו שם הייתה תופסת; הצלב של המגע נמצא לצד העיגול של הנקודה הטובה ביותר, בתוך קו המתאר הלבן הקטן של 5% העליונים. הלוח הימני מראה את החלק יורד באופן חלק עם המרחק מן הנקודה הטובה ביותר — הצורה של התרכזות אחת בעלת מרכז אחד.

המחקר • מחקר 10

STEP 1 הגדרת שאלת המחקר והבעיה

התופעה. התוריום של הירח מרוכז במערב הצד הקרוב. **הפער בידע.** הספרות קוראת את ההתרכזות כטרריין (יחידת קרום) עשיר ביסודות מפיקי חום; המודל קורא אותה כאזור המגע, 3,000 הק"מ האחרונים שנגעו בכדור הארץ. כיפה שמחזיקה את רוב התוריום מראה שהמגע והתוריום חופפים; היא אינה מראה שהמגע הוא המקום שבו התוריום מרוכז ביותר, כי כיפה שתוצב בקרבת מקום עשויה להחזיק כמותו או יותר. **שאלת המחקר:** האם

המגע שנקבע במאמר 3 מחזיק את התוריום של הירח, והאם מרכזו הוא המקום שבו כיפה בגודלו מחזיקה הכי הרבה?

STEP 2 סקירת ספרות (רקע מדעי)

Lunar Prospector מיפה את התוריום של הירח כולו ממסלול [S4]. ההתרכזות במערב הצד הקרוב נקראת Procellarum KREEP Terrane: אזור של הקרום העשיר באשלגן (K), ביסודות אדמה נדירה (REE) ובזרחן (P) — KREEP — שנקרא כשארית האחרונה של אוקיינוס המאגמה המתגבש, שהתרכזה מתחת לצד הקרוב [S22]. אוקיינוס המאגמה הוא השכבה החיצונית המותכת שהספרות מייחסת לירח הצעיר; כשהוא התגבש, היסודות שאינם נכנסים לגבישים נותרו בנוזל האחרון שלו. בקריאה הזו לטרייין אין מרכז מיוחד: זה המקום שבו השארית במקרה התרכזה. **מה חדש כאן:** התוריום נקרא מול מרכז שנקבע במאמר 3 לפני הקריאה הזו, והמרכז הזה נבדק מול כל מרכז אפשרי אחר על הירח.

STEP 3 ניסוח השערת המחקר

התוריום הובא על ידי המגע, האזור שבו הירח נגע אחרון בכדור הארץ. לכן כיפה בגודל המגע שמרכזה על המגע מחזיקה כמעט את כל עודף התוריום של הירח, ושום מרכז אחר על הירח אינו טוב ממנה באופן ניכר.

STEP 4 מערך המחקר (מתודולוגיה)

סוג המחקר: כמותי; חלקים מן העודף ומן השטח, וסריקה של הירח כולו. **המדגם:** כל תא של חצי מעלה במפת התוריום, 259,200 תאים. **הכלים:** מפת התוריום של Lunar Prospector [S4]; המגע (1,500 ק"מ) והגבעה (3,000 ק"מ) של מאמר 3; וקוד שמסכם את העודף מעל 3 ppm בתוך כיפה, תוך שקילת כל תא לפי שטחו האמיתי על הכדור, לכיפה שמרכזה בכל נקודה של רשת של 2°. כללי המדידה, והסיבה לכל אחד מהם, הם אלה:

כלל	מדוע, במילים פשוטות
העודף: תוריום מעל 3 ppm	הרמות הרחוקות מן המגע מחזיקות כ-1.2 ppm; העודף הוא התוריום שהתרכז
שקילה לפי שטח	תא סמוך לקוטב קטן מתא במשווה; כל אחד נספר לפי שטחו האמיתי
המרכז נקבע לפני הנתונים	מרכז המגע בא ממאמר 3, ולכן המבחן לא יכול היה לבחור אותו כך שיתאים לתוריום

כללי המדידה של מחקר 10, והסיבה לכל אחד מהם.

STEP 5 איסוף הנתונים (ביצוע המחקר)

המגע והגבעה נלקחו כפי שנקבעו במאמר 3. חלקם מן העודף, חלקם מן השטח שמעל 3 ppm והחציונים בפנים ובחוץ חושבו עבורם, ואחר כך עבור כיפות של 1,000, 1,500 ו-2,000 ק"מ שמרכזן בכל 16,200 הנקודות של הרשת.

STEP 6 ניתוח הנתונים ועיבודם

המגע. שישית מפני השטח (17.5%) מחזיקה 95% מן העודף ו-78% מן השטח שמעל 3 ppm; החציון הוא 5.39 ppm בתוך המגע ו-1.52 מחוצה לו. **הסריקה.** המרכז הטוב ביותר לכיפה של 1,500 ק"מ, 23° צפון 334° מזרח, מחזיק 95.14%; מרכז המגע מחזיק 94.99% ומדורג שלישי מתוך 16,200, 47 ק"מ מן הטוב ביותר. לכיפות של 1,000 ו-2,000 ק"מ הוא מדורג חמישי ותשעה-עשר. **הירידה.** החלק יורד מתחת לחצי בכ-50° מן המגע ומגיע לאפס בצד הרחוק.

תוצאה. ההשערה נתמכת: המגע מחזיק כמעט את כל עודף התוריום של הירח, ומרכזו, שנקבע לפני שהתוריום נקרא, נמצא בטווח 47 ק"מ מן המרכז הטוב ביותר על הירח, שלישי מתוך 16,200. התוריום מרוכז סביב המקום שבו הירח נגע אחרון בכדור הארץ. **מגבלות.** המגע של מאמר 3 שורטט מתוך קווי המתאר של הבזלת של הצד הקרוב, והתוריום של הטררין של הספרות נמצא על אותו אזור; לכן התלכדות המרכזים חזקה אך אינה בלתי תלויה לגמרי בבזלת. המפה מבחינה בפרטים של כ-60 ק"מ, ושחזור אחר של התוריום או סף אחר עשויים להזיז מעט את הנקודה הטובה ביותר. **כיוונים למחקר המשך.** אותה סריקה על מפות התוריום המשוחזרות ברזולוציה עדינה יותר, ומחקר 13, ששואל היכן בתוך המגע נמצא התוריום.

J.4 בתוך המגע: הימות, המישורים והרמה

J.3§ הראה שהמגע מחזיק את התוריום. סעיף זה שואל היכן בתוך המגע הוא נמצא, והתשובה מפרידה בין שני סוגי הקרקע הכהה שהמודל מבחין ביניהם. ארבעה ימות נמצאים במגע: Serenitatis, Imbrium, Copernicus H ו-Sinus Aestuum. שאר המגע עשוי משני סוגי קרקע. האחד הוא הרמה. השני הוא מישורי הבזלת: Oceanus הרגיל של החתך של האגס, שהותך במקומו על ידי החום הכללי של כדור הארץ כל עוד הגוף היה מחובר; לא הייתה לו תעלה אל העומק ולא כיפת הזנה מתחתיו (C.2§). ים הוא תעלה שחיברה את פנים כדור הארץ אל פנים הירח, ושטחו הוא הליבה של כיפת ההזנה שמתחתיו. שניהם בזלת כהה בפני השטח; הם נבדלים במה שנמצא מתחתם, ולכן במקום שאליו יכול היה ללכת הנוזל האחרון שלהם.

בתוך המגע	חלק משטחו	חציון התוריום	חלק מעודף הירח
ארבעת הימות	11.1%	3.99 ppm	5.0%
מישורי בזלת	51.8%	5.62 ppm	52.4%
רמה	37.1%	5.48 ppm	37.6%

התוריום בתוך המגע לפי סוג הקרקע: ארבעת הימות, מישורי הבזלת והרמה.

הטבלה מחלקת את המגע לשלושת סוגי הקרקע שלו. יש להשוות את העמודה הראשונה והאחרונה: סוג קרקע שמחזיק את החלק מן העודף ששטחו מקנה לו הוא רגיל למגע; סוג שמחזיק פחות איבד תוריום. השורה הכחולה, הימות, היא זו שחסרה.

בתוך המגע המישורים והרמה נושאים כמעט אותו תוריום, 5.62 ו-5.48 ppm, וכל אחד מהם מחזיק בערך את החלק מן העודף ששטחו מקנה לו. הימות נושאים הרבה פחות: 3.99 ppm, ו-5% מן העודף על פני 11% מן השטח — פחות ממחצית חלקם. כל ים של המגע עני יותר מן הקרקע שסביבו, בטבעת משפתו ועד 150 ק"מ מעבר לה:

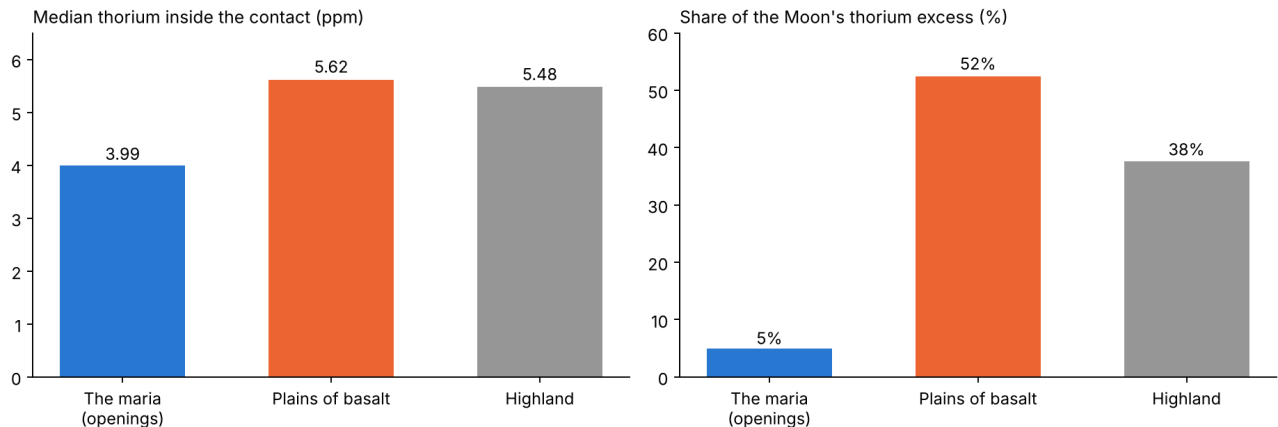
ים של המגע	הים	הטבעת סביבו	ההפרש
Imbrium	4.72 ppm	6.11 ppm	-1.39
Copernicus H	8.75	9.86	-1.11
Sinus Aestuum	6.73	7.78	-1.05
Serenitatis	2.78	3.36	-0.58

התוריום בכל אחד מארבעת הימות של המגע מול הטבעת שסביבו, משפתו ועד 150 ק"מ מעבר לה.

כל שורה מעמידה ים מול הקרקע שסביבו מיד, כך שההשוואה נעשית בתוך אזור אחד והרמה הכללית של האזור מתבטלת. ההפרש שלילי בכל שורה; הכחול דוהה מן ההפסד הגדול ביותר, Imbrium, אל הקטן ביותר, Serenitatis.

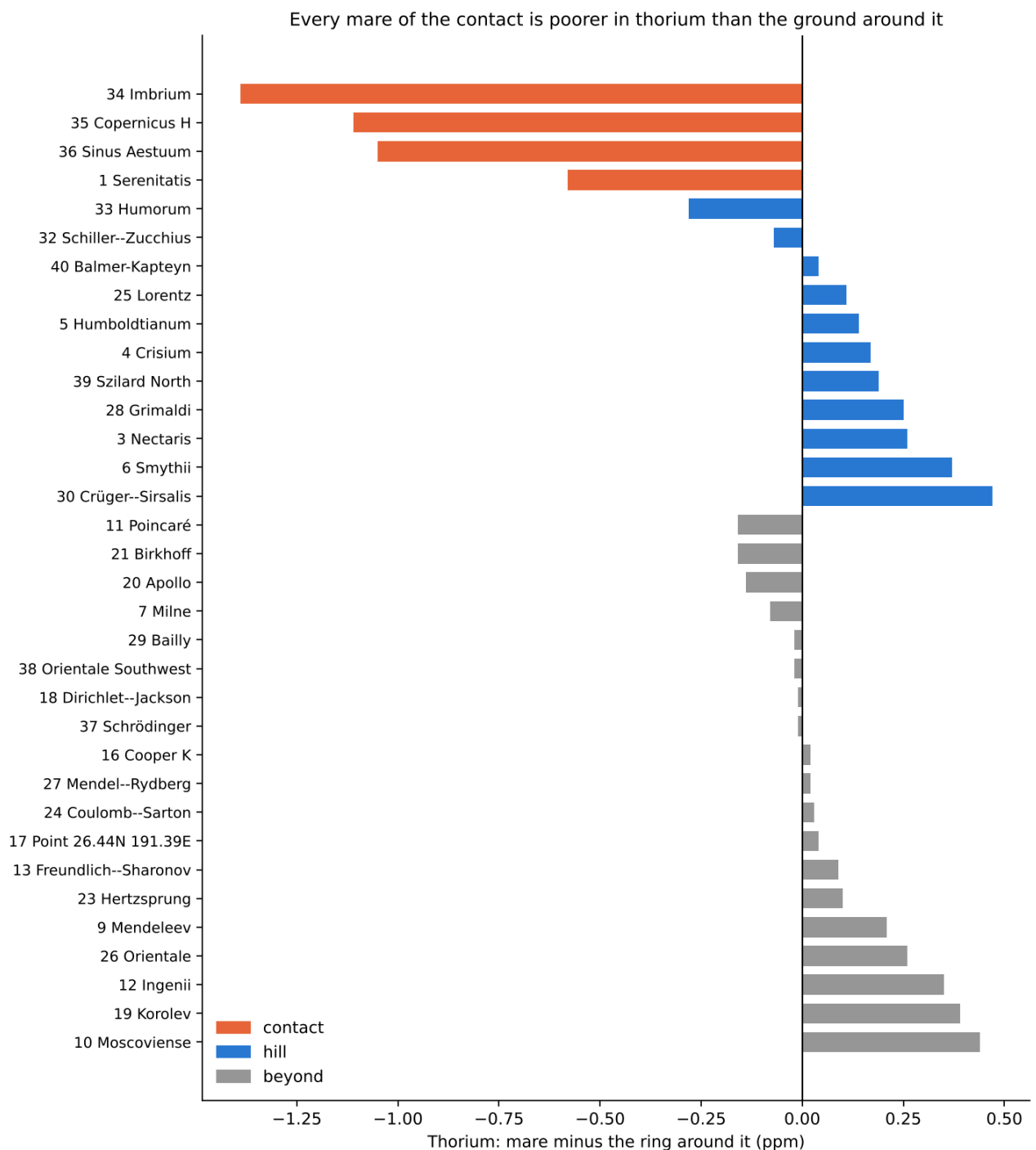
מחוץ למגע הימות שווים לקרקע שסביבם או עולים עליה: ההפרש החציוני הוא $+0.17 \text{ ppm}$ בגבעה ו- $+0.02$ מעבר לה, והימות העניים מן הטבעת שלהם הם מיעוט, 2 מתוך 11 ו-8 מתוך 19 (איור 14). לכן אובדן התוריום הוא סימן של הימות של המגע, לא של ימות באופן כללי.

Thorium: the maria of the contact are the poorest ground in it (11% of its area, 5% of the excess)



איור 13. התוריום בתוך המגע לפי סוג קרקע: החציון (משמאל) והחלק מעודף הירח מעל 3 ppm (מימין), לארבעת הימות, למישורי הבזלת ולרמה (J.4§).

איור 13 משרטט את טבלת סוגי הקרקע: העמודה של הימות נמוכה מאלה של המישורים והרמה, שהן כמעט שוות.



איור 14. התוריום בכל ים פחות התוריום בטבעת שסביבו, משפתו ועד 150 ק"מ מעבר לה: ארבעת הימות של המגע (כתום), של הגבעה (כחול) ומעבר לה (אפור) (J.4§).

באיור 14 כל ים הוא עמודה אחת: התוריום שלו פחות זה של הטבעת שלו. ארבע העמודות הכתומות של המגע כולן יורדות מתחת לאפס; העמודות של הגבעה ושל מה שמעבר לה מפוזרות סביב האפס.

תוריום וטיטניום יחד. אם הנוזל האחרון של ים התנקז, הוא היה צריך לקחת איתו תוריום בעוצמה רבה יותר מכל יסוד שהגבישים מחזיקים בחלקו. טיטניום הוא יסוד כזה. גם טיטניום נשאר בנוזל כשהתכה מתקררת, אבל בעוצמה פחותה מתוריום: כשהנוזל עשיר בו דיו, הוא מתגבש יחד עם ברזל כאילמניט ונשאר. אילמניט הוא תחמוצת של ברזל וטיטניום, מינרל כהה נפוץ בבזלות של הימות. השניים נקראו פיקסל אחר פיקסל על קרקעיות הימות ועל המישורים — טיטניום במפת השפע של Kaguya ב-128 פיקסלים למעלה, ותוריום במפה של Lunar Prospector — עם רווחי סמך מדגימה חוזרת של תאים בגודל 5° על 5°. דגימה חוזרת פירושה לדגום שוב את

התאים באקראי, פעמים רבות, ולחשב מחדש את התוצאה בכל פעם; פיזור התוצאות נותן את רווח הסמך של 95%, הטווח שבתוכו הערך האמיתי נמצא ב-95 מקרים מתוך 100. התורים נדיר הרבה יותר מן הטיטניום, ולכן כל אחד מהם ניתן כחלק מערכו על המישורים, שהם הייחוס: על מישור דבר לא יכול היה לעזוב, כי לא הייתה תעלה, והכול קפא יחד.

קרקעיות הימות מול המישורים	תורים	TiO_2 קרקעית מול מישור, תורים
בתוך המגע	(-20 עד -39) -30%	(+13 עד -20) -5%
מעבר למגע	(-3 עד -19) -12%	(+53 עד 0) +24%

קרקעיות המגע: 3.95 ppm תורים ו-3.44 wt% TiO_2 ; מישורי המגע: 5.63 ו-3.61. קרקעיות מעבר למגע: 2.14 ו-2.78; מישורים מעבר למגע: 2.43 ו-2.25.

כל תא נותן בכמה קרקעיות הימות שונות מן המישורים של אותו אזור, עם רווח הסמך של 95% בסוגריים. העמודה האחרונה מחלקת את השניים זה בזה: יחס של 1 היה אומר שתורים וטיטניום עזבו באותו יחס; יחס מתחת ל-1 אומר שהתורים עזבו יותר. ההערה שמתחת לטבלה נותנת את החציונים שמהם מחושבים החלקים.

בתוך המגע קרקעיות הימות איבדו שליש מן התורים של המישורים ושמרו על הטיטניום שלהן: התורים עזבו את הקרקעיות בעוצמה רבה יותר מן הטיטניום. ים אחר ים, היחס בין תורים לטיטניום מול המישורים של המגע הוא 0.56 ב-0.35 Serenitatis, בחלק של Humororum שבתוך המגע ו-0.83 ב-Imbrium; הוא גבוה יותר בשני הימות הקטנים שליד Copernicus, Copernicus H (1.83) ו-Sinus Aestuum (1.17). מעבר למגע הקרקעיות איבדו שמינית מן התורים של המישורים, והן נושאות יותר טיטניום מן המישורים.

כיצד המודל קורא זאת. תורים אינו נכנס לגבישים שגדלים כשהתכה מתקררת; הוא נשאר בנוזל ומתרכז באחרון שבו. מי ים שקופאים הם תמונה טובה: הקרח שנוצר כמעט מתוק, והמלח מתרכז בתמלחת שנותרת. בים ההתכה התקררה מפני השטח פנימה, והנוזל שנותר, שנשא את התורים, שקע בחזרה במורד התעלה לעבר פנים הירח ופנים כדור הארץ. הים נותר עני יותר מן הקרקע שסביבו. למישור לא הייתה תעלה: הקרום המותך שלו קפא במקום שבו היה ושמר על התורים שלו, כפי שעשתה הרמה. לכן המגע בכללותו מחזיק את התורים, ובתוכו התעלות מחזיקות הכי מעט.

גם הטיטניום ירד עם הנוזל האחרון, אבל פחות: חלק גדול ממנו הוחזק באילמניט ונשאר. בתוך המגע המישורים עשירים בטיטניום, והקרקעיות שאיבדו חלק מן הטיטניום שלהן שוות להם. מחוץ למגע הימות קפאו מהר, ולא היה זמן רב לנוזל לשקוע: הם איבדו פחות תורים, שמינית לעומת שליש. המגע שכב מעל אמצע המעבר שהאגס יצר בין פנים כדור הארץ לירח, עשיר בחומר כבד; הימות הרחוקים היו בקצה המעבר הזה, שם הגיע החומר הקל ביותר של כדור הארץ המתממין, והמישורים שמעבר למגע, שהוזנו בו, דלים בטיטניום, ולכן הימות שם נושאים יותר טיטניום מן המישורים שלהם. התמיינות היא היפרדות של גוף לשכבות בעלות הרכב שונה — הכבד שוקע והקל עולה; כדור הארץ התממין בזמן שהזין את הגוף, ולכן החומר שהגיע אל הקצה הרחוק של הצינור היה הקל ביותר.

STEP 1 הגדרת שאלת המחקר והבעיה

התופעה. המגע מחזיק כמעט את כל התורים של הירח (מחקר 10), ובתוכו חלק מן הקרקע הכהה עשיר בתורים וחלק עני יותר. **הפער בידע.** הבזלת של המגע נקראה כסוג אחד. במודל היא משני סוגים: הימות, תעלות אל העומק מעל כיפת הזנה, והמישורים, קרום רגיל שהותך במקומו. אם השניים נושאים אותו תורים — לא נמדד. **שאלת המחקר:** בתוך המגע, האם הימות, מישורי הבזלת והרמה נושאים אותו תורים, והאם כל ים

עשיר או עני מן הקרקע שסביבו; והאם התוריום עזב את קרקעיות הימות בעוצמה רבה יותר מן הטיטניום, שגם הוא נשאר בנוזל אבל פחות?

STEP 2 סקירת ספרות (רקע מדעי)

תוריום הוא יסוד בלתי תואם: הוא אינו נכנס למינרלים הנפוצים שמתגבשים מהתכה, והוא מתרכז בנוזל האחרון שנותר [S24]. בספרות ה-KREEP העשיר בתוריום הוא אותו נוזל אחרון של אוקיינוס המאגמה, והבזלות של הצד הקרוב עשירות בו במקום שבו עלו דרכו או התיכו אותו [S22]. **מה חדש כאן:** הקרקע של המגע מחולקת לפי מה שנמצא מתחתיה — ים, שזוהה על מפלי הכבידה מעל כיפת הזנה, או מישור בלעדיה — והתוריום של כל אחד מהם מושווה לרמה של אותו אזור ולסביבתו שלו.

STEP 3 ניסוח השערת המחקר

בים ההתכה התקררה מלמעלה, והנוזל האחרון, שנושא את התוריום, שקע בחזרה במורד התעלה. לכן בתוך המגע הימות עניים יותר בתוריום מן המישורים ומן הרמה, וכל ים עני יותר מן הקרקע שסביבו; המישורים, שלא הייתה להם תעלה, נושאים את התוריום של הרמה. הטיטניום, שהוחזק באילמניט, עזב פחות: מול המישורים, שבהם דבר לא יכול היה לעזוב, היחס בין תוריום לטיטניום על קרקעיות הימות נמוך יותר, ובמידה הרבה ביותר בתוך המגע, שבו הימות נשארו נוזליים הכי הרבה זמן.

STEP 4 מערך המחקר (מתודולוגיה)

סוג המחקר: כמותי; חציונים לפי סוג קרקע, חלקים מן העודף, וכל ים מול הקרקע שסביבו. **המדגם:** כל תא של חצי מעלה במפת התוריום; 34 הימות של נספח A, ארבעה מהם במגע. **הכלים:** מפת התוריום של Lunar Prospector [S4], מפת שפע הטיטניום של Kaguya ב-128 פיקסלים למעלה [S3], מפת הימות של LROC [S1] למישורים, כיפות ההזנה של שדה GRAIL (חלק C), וקוד שמסווג כל תא וקורא טבעת סביב כל ים. כללי הסיווג, והסיבה לכל אחד מהם, הם אלה:

כלל	מדוע, במילים פשוטות
שטחו של ים: הליבה של כיפת ההזנה שלו	התעלה נמצאת מעל הכיפה; הכיפה קובעת את היקפה
מישור: בזלת של מפת LROC מחוץ לכל ים	בזלת שאין מתחתיה תעלה
הטבעת: משפת הים ועד 150 ק"מ מעבר לה, כשימות אחרים מוסרים	כל ים מושווה לקרקע שלצדו, כך שהאזור זהה בשני הצדדים
חציונים משוקללים לפי שטח	כל תא נספר לפי שטחו האמיתי על הכדור

כללי הסיווג של מחקר 13, והסיבה לכל אחד מהם.

STEP 5 איסוף הנתונים (ביצוע המחקר)

הימות נקבעו על מפלי הכבידה לפני שהתוריום נקרא. אחר כך ניתן לכל תא של המגע סוג הקרקע שלו — ים, מישור או רמה — וכל ים נקרא בפנים ובטבעת שלו.

STEP 6 ניתוח הנתונים ועיבודם

לפי סוג קרקע. בתוך המגע הימות מחזיקים 3.99 ppm, המישורים 5.62 והרמה 5.48. הימות מחזיקים 5.0% מעודף הירח על פני 11.1% משטח המגע; המישורים 52.4% על פני 51.8%; הרמה 37.6% על פני 37.1%. כל ים של המגע. כל ארבעתם עניים מן הטבעת שלהם: Imbrium ב-1.39 ppm, Copernicus ב-1.11 ppm, Sinus Aestuum ב-1.05, Serenitatis ב-0.58. מחוץ למגע. הימות שווים לטבעת שלהם או עולים עליה: ההפרש החציוני הוא +0.17 ppm בגבעה (11 ימות) ו-0.02+ מעבר לה (19 ימות). תוריום וטיטניום. בתוך המגע הקרקעיות נושאות 30% פחות תוריום מן המישורים (רווח סמך של 95%: 20–39%) ואותו טיטניום (5%–, מ-

20– עד 13+); היחס בין השניים, קרקעית מול מישור, הוא 0.74 (0.60–0.88). מעבר למגע הקרקעיות נושאות 12% פחות תורים (3–19%) ו-24% יותר טיטניום (0 עד 53%); היחס הוא 0.71 (0.58–0.91).

7 STEP הסקת מסקנות וכתובת הדוח

תוצאה. ההשערה נתמכת: בתוך המגע הימות הם הקרקע העניה ביותר בתורים, כל ים שם עני יותר מן הקרקע שסביבו, והמישורים נושאים את התורים של הרמה. התורים שהמגע ריכוז נמשך בחזרה במורד התעלות עם אחרון ההתכה, בעוצמה רבה יותר מן הטיטניום, שהאילמניט עיכב; בתוך המגע, שבו הימות נשארו נזליים הכי הרבה זמן, הקרקעיות איבדו שליש מן התורים שלהן ודבר מן הטיטניום שלהן. **מגבלות.** המגע מחזיק ארבעה ימות; מפת הטיטניום היא תוצר מכויל עם פיזור של 0.43 wt% באתרי הכיול שלה, ושתי המפות שונות ברזולוציה; מחוץ למגע היחס מונמך באותה מידה כמו בתוכו, בעיקר בגלל טיטניום עשיר יותר על הקרקעיות מאשר על המישורים; מפת התורים מבחינה בפרטים של כ-60 ק"מ, כך ששפת הים מתערבבת עם הטבעת שלו, ומה שזה עושה, אם בכלל, הוא להקטין את ההפרש הנמדד. **כיוונים למחקר המשך.** התורים במפות המשוחזרות ברזולוציה עדינה יותר מעל כל ים של המגע, והיחס בין תורים לטיטניום כשהוא נקרא ים אחר ים מעבר למגע.

5 J. לפי קו אורך

את אותו תורים אפשר לקרוא לפי ארבעת הרבעים של הירח: הגזרה של הצד הקרוב הפונה אל כדור הארץ, הצד הרחוק שמולה, החצי המוביל, שפונה לכיוון תנועת הירח במסלולו ומרכזו ב-90° מערב, והחצי הנגרר, שמרכזו ב-90° מזרח (B.2§). גזרת הצד הקרוב מחזיקה חציון של 5.12 ppm, החצי המוביל 3.27, הצד הרחוק 2.20, החצי הנגרר 2.01; הצד הקרוב כולו 2.56 לעומת 1.76 בצד הרחוק. הסדר הולך אחרי המגע. מרכזו, ב-335.2° מזרח, נמצא בצד הקרוב ובחציו המערבי, המוביל; גזרת הצד הקרוב, שמחזיקה אותו, היא העשירה ביותר, החצי המוביל אחריה, והצד הרחוק והחצי הנגרר, שנמצאים הרחק ממנו, הם העניים ביותר. הצד הקרוב בכללותו נושא בערך פי אחד וחצי מן התורים של הצד הרחוק.

6 J. כיצד המודל קורא את התורים

הספרות קוראת את התורים של Procellarum כ-KREEP, השארית האחרונה של אוקיינוס מאגמה מתגבש, שהתרכזה מתחת לצד הקרוב וחיממה אותו. המודל קורא אותו כסימן של המגע: האזור שבו הירח נגע אחרון בכדור הארץ, שדרכו עבר החומר האחרון. שלוש תוצאות נושאות את הקריאה הזו. העודף ממורכז על המגע שנקבע מראש (מחקר 10). בתוך המגע מישורי הקרום המותך והרמה נושאים כמעט אותו תורים, ולכן התורים שייך לאזור ולא לבזלת. והימות של המגע, התעלות אל העומק, נושאים הכי מעט, כי הנוזל האחרון, שמחזיק את התורים, שקע בחזרה במורדן (מחקר 13).

התוצאה השנייה והשלישית הן אלה שקריאת השארית אינה צופה. בקריאה ההיא הבזלות של הצד הקרוב עשירות בתורים במקום שבו עלו דרך השארית או התיכו אותה (מחקר 13, שלב 2); היא אינה נותנת סיבה לכך שהקרקע הכהה מעל התעלות תהיה העניה ביותר באזור. בתוך המגע הסדר הנמדד הוא זה שהמודל נותן: מישורים ורמה דומים, והימות הנמוכים ביותר.

7 J. המסה הזרה של אגני הימות

היסוד האחרון של חלק זה בודק ישירות את הקריאה האחרת של הימות. בספרות אגני הימות נחפרו על ידי גופים גדולים מבחוץ, וגופים כאלה משאירים מאחור חלק מן המסה שלהם. המסה הזו נושאת יסודות סידרופיליים — היסודות "אוהבי הברזל", כמו אירידיום, אוסמיום ורותניום, שהולכים אחרי המתכת — ביחסים שתואמים סוג ידוע של מטאוריט. *כונדריטים* הם הסוג הנפוץ ביותר, מטאוריטים אבניים שהיחסים שלהם ביסודות האלה ידועים היטב; אגן שנחפר על ידי גוף כזה צריך לשאת את טביעת האצבע שלו.

מאמר 6 (L.5§) שאל איזו מסה זרה תיעוד המכתשים דורש, כשהוא נקרא כגופים פוגעים חיצוניים, ומצא שהקרום מחזיק פחות ממה שהמכתשים הנראים לבדם דורשים. אגני הימות נושאים את החלק הגדול ביותר ממנה אחרי South Pole–Aitken.

מבחן	תוצאה	הספרות קוראת	המודל קורא	מסקנה
מסה זרה לאגני הימות	כ- 1×10^{19} ק"ג ב-18 ק"מ/ש'; Imbrium לבדו 3×10^{18} לפי קנה מידה ו- 2×10^{19} לפי הגוף של 250 ק"מ שהוצע לו [S12]	הגופים שחפרו את האגנים	אין גוף: האגנים הם פתחים	את המסה יש למצוא
היחסים הסידרופיליים של ההתכות של Imbrium	אינם תואמים אף קבוצת כונדריטים [S13]	גוף לא ידוע, או מתכת של ליבת פלנטזימל	חומר ארצי ידוע, בשלב ההתמיינות שלו	מוסבר בלי סוג חדש של גוף
יסודות סידרופיליים שהוסיפו האגנים המאוחרים	עיקרם היה בקרום לפני Imbrium ו-Serenitatis, שבעיקר ערבבו אותם [S13]	האגנים המאוחרים הוסיפו מעט	לא היה דבר זר להוסיף	כפי שהמודל צופה

שלוש תוצאות של הספרות על אגני הימות, עם קריאת הספרות וקריאת המודל לכל אחת.

הטבלה מעמידה שלוש תוצאות של הספרות זו לצד זו, כל אחת עם הקריאה של הספרות ושל המודל. העמודה האחרונה צבועה לפי מעמדה של כל תוצאה עבור המודל: הראשונה היא מסה שקריאת הפגיעה דורשת וצריכה למצוא, והשורות הירוקות הן תוצאות שהמודל מסביר ישירות — הירוק הכהה יותר הוא זה שהוא צופה.

המספרים של השורה הראשונה דורשים מילה. מכתש בגודל ידוע דורש גוף במסה מסוימת, בהינתן מהירותו; 18 ק"מ/ש' היא המהירות שבה השתמש מאמר 6 לגופים המגיעים אל הירח. במהירות הזו אגני הימות יחד דורשים כ- 10^{19} ק"ג — עשרה מיליארד מיליארד קילוגרם. ל-Imbrium ניתנות שתי הערכות: 3×10^{18} ק"ג מקנה המידה שבין גודל מכתש למסת גוף, ו- 2×10^{19} ק"ג מן הגוף של 250 ק"מ שהספרות מציעה לו.

גוף בגודל שהספרות מייחסת ל-Imbrium היה משאיר, לפי שיעור השימור של הספרות עצמה, חמישית, כ- 4×10^{18} ק"ג של חומר זר בקרבת האגן, ו- 6×10^{17} ק"ג לפי הערכת קנה המידה (גרסה קודמת נתנה כ- 10^{18} ק"ג לשתייה); ההתכות של האגן נושאות יחסים שאינם תואמים אף גוף ידוע, והאגנים המאוחרים הוסיפו מעט ליסודות הסידרופיליים של הקרום. שיעור השימור הוא החלק ממסת גוף פוגע שנשאר על הירח ואינו נמלט כאדים וכרסיסים מהירים. במודל אגני הימות הם פתחים, ולא היה גוף שישאיר את מסתו.

1 STEP הגדרת שאלת המחקר והבעיה

התופעה. אגני הימות נקראים בספרות כאגנים שנחפרו על ידי הגופים הגדולים ביותר שפגעו בירח אחרי South Pole–Aitken. **הפער בידע.** גופים כאלה היו צריכים להשאיר את החלק הגדול ביותר של המסה הזרה בקרבת האגנים; כמה מסה הם דורשים, ומה ההתכות של האגנים נושאות, לא הועמדו זה לצד זה. **שאלת המחקר:** איזו מסה זרה דורשים אגני הימות, כשהם נקראים כאגנים שנחפרו על ידי גופים מבחוץ, והאם ההתכות של האגנים נושאות אותה?

STEP 2 סקירת ספרות (רקע מדעי)

הגוף שחפר את Imbrium מוערך בכ-250 ק"מ [S12]; היסודות הסידרופיליים של ההתכות של Imbrium אינם תואמים אף קבוצה ידועה של כונדריטים, ועיקר היסודות הסידרופיליים של הקרום היה שם לפני Imbrium ו-Serenitatis [S13]; שיעור השימור ומאזן הקרום ניתנים ב-[S23]. **מה חדש כאן:** המסה מחושבת לאגני הימות יחד, והתוצאות של הספרות עצמה על ההתכות שלהם מוצבות מולה בטבלה אחת.

STEP 3 ניסוח השערת המחקר

אגני הימות הם פתחים, ולכן שום גוף לא השאיר שם את מסתו: ההתכות של האגנים אינן נושאות חתימה זרה של המסה שהספרות דורשת, והאגנים המאחרים לא הוסיפו לקרום דבר זר.

STEP 4 מערך המחקר (מתודולוגיה)

סוג המחקר: כמותי בחישוב, עם סקירה של הגאוכימיה שפורסמה. **המדגם:** אגני הימות; הנתונים הסידרופיליים שפורסמו על ההתכות של Imbrium ו-Serenitatis. **הכלים:** קנה המידה שבין גודל מכתש למסת גוף ששימש במאמר 6 (מחקר 8), ב-18 ק"מ/ש', ושיעור השימור של הספרות, חמישית [S23].

STEP 5 איסוף הנתונים (ביצוע המחקר)

המסה חושבה לכל אגן של ים; התוצאות הסידרופיליות נלקחו מן הספרות כפי שפורסמו. הערכים הם הטבלה של J.7.

STEP 6 ניתוח הנתונים ועיבודם

המסה. אגני הימות דורשים כ- 1×10^{19} ק"ג; Imbrium לבדו 3×10^{18} ק"ג לפי קנה מידה, ו- 2×10^{19} ק"ג לגוף של 250 ק"מ שהוצע לו. בשימור של חמישית, 6×10^{17} עד 4×10^{18} ק"ג של חומר זר היו צריכים להימצא בקרבת Imbrium. ההתכות. היחסים הסידרופיליים שלהן אינם תואמים אף קבוצת כונדריטים, והאגנים המאחרים ערבבו את מה שכבר היה בקרום במקום להוסיף לו.

STEP 7 הסקת מסקנות וכתיבת הדוח

תוצאה. ההשערה נתמכת על ידי התוצאות של הספרות עצמה: ההתכות של האגנים אינן נושאות אף גוף זר ידוע, והאגנים המאחרים הוסיפו מעט. **מגבלות.** המסה נשענת על מהירות ועל שיעור שימור מונחים; ההתכות נדגמו באתרים מעטים, רובם של Imbrium; הסקירה נשענת על אנליזות שפורסמו, לא על אנליזות חדשות. **כיוונים למחקר המשך.** איזוטופים של רותניום ואוסמיום בהתכות של כל אגן של ים, מול המסה המטאוריטית של גוף בגודל שהספרות נותנת. איזוטופים הם צורות של יסוד אחד שנבדלות במשקלן; היחסים בין האיזוטופים של רותניום ואוסמיום יכולים להיות שונים בין חומר מטאוריטי לחומר ארצי, ולכן הם יכולים להבחין בין מסה זרה לבין המסה של כדור הארץ עצמו.

מה יש בידינו עכשיו. הכימיה מספרת את אותה היסטוריה כמו המכתשים והכבידה. הברזל והטיטניום סביב כל ים משרטטים את החומר שזרק — רחוק וקל תחילה, קרוב וכבד בסוף. התוריום מרוכז על המגע, שנקבע מראש, ובתוכו הימות, שהנוזל האחרון שלהם התנקז במורד התעלות, מחזיקים הכי מעט. ואגני הימות אינם נושאים את המסה הזרה שגופים מבחוץ היו משאירים.

חלק K — תיארוך

הבניה

גיל של בזלת אינו הגיל של פתח. **הגישה:** מבחינים בין השעונים של הפתח ונותנים לכל אחד שם, קוראים את הגילים הרדיומטריים כהתקררות, ואת הסדר היחסי של הימות לוקחים ממה שמונח על הקרקעיות שלהן.

החלקים הקודמים מיקמו את הפתחים במרחב וקראו את הקרקעיות שלהם, את הכימיה שלהם ואת המכתשים שלהם. חלק זה שואל מתי. לשאלה יש משקל, כי התשובה המקובלת — גיל הבזלת שהובאה בידי המשימות — נלקחת פעמים רבות כגיל הים עצמו; אילו כך היה, בזלת בת 2.0 מיליארד שנה הייתה פירושה פתח שנוצר לפני 2.0 מיליארד שנה, זמן רב אחרי שהירח עזב את כדור הארץ. המודל מפריד בין השניים, וחלק זה מסביר כיצד.

K.1 חמישה שעונים

כל פתח נושא חמישה זמנים שאינם חייבים להסכים זה עם זה: $t_{\text{structure}}$, מתי הפתח נוצר; t_{exp} , מתי נחשף לחלל; t_{vent} , מתי החל להשליך; t_{shutdown} , מתי נאטם; ו- t_{surface} , גיל פני השטח הנראים היום. פתח זקן יכול לשאת פני שטח צעירים, וגיל של בזלת אינו הגיל של הפתח.

הכי קל להחזיק את החמישה בנפרד בעזרת תמונה של באר. באר נחפרת בזמן אחד ($t_{\text{structure}}$); המכסה שלה מורם מאוחר יותר (t_{exp}); מים עולים בה לראשונה מאוחר עוד יותר (t_{vent}); היא נסתמת כשהיא מתייבשת (t_{shutdown}); והשלולית שמתייבשת לאחרונה בפתחה היא מה שמבקר מוצא היום (t_{surface}). דגימה שנלקחה מן השלולית מתארכת את השלולית, לא את החפירה. במודל הסדר נקבע על ידי הבנייה: פתח נוצר מתחת לכיסוי, נחשף כשהמגע נסוג מעבר לו (חלק I), משליך כל עוד הוא מוזן, ונאטם כשההזנה נפסקת. התנאי הקושר שניים מן השעונים האלה הוא משוואה (4), $t_{\text{shutdown}} \geq t_{\text{exp}}$ (H.3§).

מה מודדים הגילים הרדיומטריים. הבזלות של אתרי Apollo מתוארכות ל-3.1–3.9 מיליארד שנה, אלה של Chang'e-5 לכ-2.0 מיליארד שנה [S8], ואלה של Chang'e-6, בצד הרחוק, לכ-2.8 מיליארד שנה [S9]. המודל קורא אותם כהתקררות. שעון רדיומטרי סופר את אטומי הבת שנוצרו מדעיכה של אטום אם; הוא מתחיל לפעול רק כשהחומר התקרר מספיק כדי להחזיק את אטומי הבת במקומם. לפני כן הם בורחים או מתערבבים, והשעון נשאר על אפס. לזה הכוונה כשאומרים שדגימה רושמת מתי המערכת שלה "נסגרה". החום של פנים הירח ושל הליבה שלו עזב לאט, ודגימה רושמת מתי המערכת שלה נסגרה, לא מתי הפתח שלה נוצר. לכן פתח שנוצר בזמן הבנייה — שנמשכה כ-600 מיליון שנה והסתיימה בשחרור לפני 3.873 מיליארד שנה — יכול לשאת על פניו בזלת שנסגרה מאות מיליוני שנים ויותר אחרי השחרור, ככל שהחום שמתחתיו עזב לאט. הגילים הזקנים ביותר של Apollo, סמוך ל-3.9 מיליארד שנה, קרובים לשחרור; הצעירים יותר, וה-2.8 וה-2.0 מיליארד שנה של המשימות הסיניות, רושמים התקררות מאוחרת של חומר שנשאר חם. הדגימות רדודות; זהות החומר העמוק נמחקת עם העומק, אבל הגאומטריה נשארת. דגימה מספרת מה היה החלק העליון של הפתח כשהתקרר לאחרונה; הצורה של הפתח ושל הכיפה שמתחתיו, כפי שהן נקראות בכבידה (חלקים C-E), מספרות מה היה הפתח.

מומחה עשוי לטעון שבזלת היא לבה שפרצה ושגילה הוא גיל ההתפרצות. במודל השניים מתלכדים רק עבור הנוזל האחרון שהגיע לפני השטח וקפא שם; זה הגיל של t_{surface} , או לכל היותר של t_{shutdown} . זה אינו הגיל של

$t_{\text{structure}}$, שהוא הנושא של המאמר הזה.

תיארוך בלי איזוטופים. נשמרים שני שעונים יחסיים: סופרפוזיציה — מה מונח על מה — הנותנת סדר בלי שנים; וצפיפות המכתשים, המשווית בין פני שטח כל עוד אינה מומרת לשנים. סופרפוזיציה היא הכלל ששכבה המונחת על שכבה אחרת היא הצעירה מן השתיים, כמו שהדף העליון בערימת ניירות הונח אחרון. צפיפות המכתשים היא מספר המכתשים ליחידת שטח: פני שטח שנחשפו זמן רב יותר אספו יותר מכתשים, ולכן אפשר לדרג לפיה שני משטחים. ההמרה לשנים מניחה שטף קבוע של גופים מבחוץ, וזה בדיוק מה שמאמר 6 מחליף, ולכן היא אינה בשימוש. במאמר 6 כמעט כל המכתשים נוצרים מחומר חוזר, שהקצב שלו עלה וירד עם הפעילות של הפתחים ושל כדור הארץ; ספירת מכתשים מסדרת לכן משטחים, אבל קצב הגעה קבוע אינו יכול להפוך אותה לשנים.

K.2 הסדר היחסי של הימות

הסדר שבו נאטמו הימות נקרא ממה שמונח עליהן, לא מגיל הבזלת שלהן. שלושה תיעודים נותנים אותו, כל אחד מחלק קודם.

הקרקעיות של ימות המגע הן הנקיות ביותר ממכתשים קטנים, כקבוצה: הן נאטמו אחרונות (F.5§). קרקעית מתחילה לאסוף מכתשים רק משקפאה, ולכן הקרקעית עם המעט ביותר מכתשים קפאה אחרונה. הימות הגדולות של הצד הקרוב, Serenitatis-I Imbrium, נושאות פי שלושה-עשר עד פי שמונה-עשר פחות מכתשים של 20 ק"מ ומעלה מאשר הרמות (Procellarum, מישור, אינו נמנה): הן קפאו אחרי שרוב החומר החוזר כבר נחת (I.5§). הפתחים הקבורים של הצד הרחוק זקנים מן הכיסוי שמעליהם, והכיסוי נושא את המכתשים של זמנו (D.5§): כאן הסופרפוזיציה מציבה את הפתח לפני השכבה שקברה אותו.

יחד הם נותנים סדר בלי שנים: תחילה הפתחים הקבורים של הצד הרחוק, אחריהם הימות הפתוחות של החגורה, והימות של המגע אחרונות. המבחן של סדר רדיומטרי מנוסח ב-M.3§: הבזלת הצעירה ביותר של כל ים מול המרחק שלה ממרכז שנקבע לפני הנתונים, כשהתוריום מוחזק קבוע. התוריום מוחזק קבוע משום שהוא יסוד מפיק חום (J.3§): ים עשיר בו יכול היה להישאר חם זמן רב יותר מסיבה זו לבדה, והבזלת הצעירה ביותר שלו הייתה אז צעירה מסיבה שאינה קשורה למקומו. רק אחרי שהאפקט הזה מוסר אפשר לשפוט את המרחק מן המרכז.

מה שיש בידינו עכשיו הוא דרך לסדר את הפתחים שאינה תלויה בגילי הבזלות של פני השטח שלהם: הגילים האלה מתארכים התקררות, וסדר האטימה נקרא מן הקרקעיות.

חלק L — סטטיסטיקה

הבעיה

כל השוואה במאמר תלויה במה שמושווה למה. **הגישה:** מפרטים את הנתונים, את המסכות ואת השחזור, וכל תוצאה שנמדדה מרוכזת בטבלה אחת עם המדגם שלה ועם אי הוודאות שלה.

חלק זה מרכז במקום אחד כיצד התקבלו המספרים של המאמר ועד כמה אפשר לסמוך עליהם. קורא המפקפק בתוצאה צריך למצוא כאן מה הושווה למה, על איזה מדגם, ומה גודל אי הוודאות.

L.1 נתונים ומסכות

המוצרים הם אלה של טבלת הסביבה. כל השוואה של הקרקע היא השוואה של דומה לדומה: הימות מוסרות משני הצדדים, וההשוואה אומרת זאת במפורש. לכלל הזה יש משקל משום שהימות עצמן עניות במכתשים ועשירות בברזל. אילו מדידה סביב ים כללה חלק מקרקעית של ים בעוד הביקורת שלה לא כללה, הים היה דוחף את התוצאה לכיוון אחד מסיבה שאין לה קשר לשאלה; הסרת הימות משני הצדדים — מן המדגם ומן הביקורת שלו — הופכת את שני הצדדים לברי השוואה. "מסכה" היא רשימת השטחים האלה שנשארים מחוץ לספירה.

השטחים מחושבים על הכדור; מכתשים משויכים לפי מרכזיהם; הקרקעית של יחידה היא השטח שבתוך המצולע שלה. חישוב על הכדור נמנע מן המתיחה של היטלי מפה שטוחים, שבהם שטח סמוך לקטבים נראה גדול ממה שהוא. מכתש החוצה את שולי קרקעית נספר במקום שבו נמצא מרכזו, כך ששום מכתש אינו נספר פעמיים. כיפות ההזנה נלקחות משדה Bouguer בדרגות 6–660, עם בדיקה בלתי תלויה ב-6–900. שדה Bouguer הוא שדה הכבידה אחרי שהוסרה ממנו המשיכה של הטופוגרפיה הנראית, כך שמה שנשאר מראה את הגופים הצפופים והקלים שמתחת לפני השטח; ה"דרגות" קובעות את הפרט העדין ביותר שנשמר, ודרגה גבוהה יותר שומרת תכונות קטנות יותר. כיפה שנמצאת בשתי ההגדרות אינה תוצר לוואי של בחירת מסנן אחת.

L.2 שחזור

הסקריפטים המפיקים כל טבלה במאמר הזה מפורטים בסעיף זמינות הקוד, יחד עם הקלטים שלהם. ספירות המכתשים המוקדמות סביב הימות, שנעשו לפני המאמר הזה, משוחזרות בקוד חדש לפני שמשתמשים בהן; ערך שלא ניתן היה לשחזר אינו בשימוש. כל מספר במאמר ניתן לכן לחישוב מחדש בידי קורא מתוך הקלטים המופקדים.

L.3 התוצאות שנמדדו, בטבלה אחת

הטבלה מרכזת כל תוצאה שנמדדה במאמר יחד עם הסעיף שבו היא מופיעה. כל שורה נותנת מה נמדד, על כמה יחידות, את התוצאה ואת אי הוודאות שלה. את העמודה האחרונה יש לקרוא כך. טווח המסומן "95%" הוא מרווח שמכיל את הערך האמיתי ב-95 מכל 100 חזרות על המדידה; כשהוא אינו חוצה את האפס, לאפקט יש סימן מוגדר. p הוא ההסתברות לתוצאה חזקה לפחות כמו זו שנמדדה אילו לא היה שום אפקט; $p = 0.02$ פירושו 2 פעמים מתוך 100, p -קטן הוא מה ש"מעבר למקרה" פירושו במאמר הזה. כל אחד מן המבחנים בעלי השם עונה על סוג אחד של שאלה:

- מבחן הסימן שואל רק כמה מקרים הלכו לכיוון אחד: אילו המרכז והשוליים היו בעלי סיכוי שווה להיות הגבוהים, 10 מתוך 12 או יותר היו קורים כ-2 פעמים מתוך 100, ו-16 מתוך 16 כפעם אחת מתוך 65,000)
 $(p = 1.5 \times 10^{-5})$
 - מתאם הדרגות ρ שואל אם שני מדדים עולים ויורדים יחד: הוא נע מ-1 עד +1, ו-0.59 $\rho = -$ פירושו שככל שהכיפה חזקה יותר, המרכז נמוך יותר, באופן עקבי למדי לאורך 12 הימות;
 - מבחן Mann–Whitney משווה שתי קבוצות על ידי דירוג כל הערכים שלהן יחד ושאלה אם קבוצה אחת יושבת גבוה יותר בדירוג, כך שכמה ערכים קיצוניים אינם יכולים להכריע אותו;
 - המבחן המדויק של Fisher משווה שני שיעורים, כאן שיעור המכתשים החדים על שתי קבוצות של קרקעיות, ונותן את ההסתברות המדויקת לחלוקה לא שוויונית לפחות באותה מידה במקרה.
- ההשוואות שבהן נקראים הברזל או צפיפות המכתשים סביב הימות מסירות את הימות משני הצדדים, כפי ש-L.1§ דורש.

מדד	מדגם	תוצאה	אי ודאות
ימות על כיפת הזנה (C.5§)	34 ימות, 73 כיפות	33 מתוך 34	—
FeO, ליבת כיפה קבורה פחות הסביבה (D.5§)	44 כיפות	-0.19 אחוזי משקל	95%: -0.37 עד +0.14
FeO, כיפה מתחת לים (D.5§)	מותאם	+1.47 אחוזי משקל	+0.59 עד +2.49
תוריום, ליבת כיפה קבורה פחות הסביבה (D.5§)	44 כיפות	+0.05 ppm	-0.02 עד +0.09
מרכז מול שוליים, ימות פתוחות (E.2§)	12 ימות	10 מתוך 12 נמוכים יותר; חציון -267 מ'	מבחן הסימן $p = 0.02$
גובה המרכז מול עוצמת הכיפה (E.2§)	12 ימות פתוחות	$\rho = -0.59$	$p = 0.04$
מפלס אחד ליחידה (F.1§)	189 יחידות	188	—
קרקעית מתחת לשפה וליבשה (F.1§)	16 ימות	16 מתוך 16; 3.4 ו-1.6 ק"מ	מבחן הסימן $p = 1.5 \times 10^{-5}$
צווארון סביב הימות הרחוקות (F.3§)	27 ימות, 170 ביקורות	+471 מ' מול +122 מ'	Mann–Whitney $p = 0.009$
ברזל הקרקע, מול 150–100 ק"מ (J.1§)	6 ימות	6.9 מול 3.1 אחוזי משקל FeO; 3.4 ב-300–600 ק"מ	ביקורות 2.3
מכתש פחות הקרקע שלו, 50–0 ק"מ, ימות (C.7§)	1,059 מכתשים, 5,922 ביקורות	-0.26 אחוזי משקל FeO	95%: -0.34 עד -0.19; ביקורות -0.01
מכתשים של 5–2 ק"מ על קרקעיות מול היבשה (F.5§)	10 ימות פתוחות	חציון 8% (4%–23%)	—
מכתשים של 10 ק"מ ומעלה על קרקעיות, מעבר למגע מול המגע (F.6§)	10 ימות פתוחות	83 ×	לפחות 25 ×

מכתשים של 2–5 ק"מ, קרקעיות ימות מול מישורים, המגע (G.2§)	הצד הקרוב	263 מול 836 למיליון קמ"ר —	
מכתשים חדים של 3–10 ק"מ, קרקעיות המגע מול מעבר לו (G.2§)	275 מכתשים	82% מול 56%	$p \approx 5 \times 10^{-6}$ Fisher
שפה חסרה לכיוון המישור, מכתשים של 40 ק"מ ומעלה (G.6§)	מישורי המגע מול מעבר לו	24% + מול 0%	95%: 10 עד 35; -6 עד 0
תוריום מעל 3 ppm במגע (J.3§)	הירח כולו	95.0% על 17.5% מן השטח; 78% מן השטח מעל 3 ppm	—
מרכז המגע בין כל המרכזים (J.3§)	16,200 כיפות של 1,500 ק"מ	שלישי; 47 ק"מ מן הטוב ביותר	0.02% העליונים
תוריום בתוך המגע: ימות / מישורים / רמות (J.4§)	כל התאים	ppm 5.48 / 5.62 / 3.99	—
ימות המגע מול הטבעת שלהן (J.4§)	4 ימות	כולן עניות יותר, ב-0.58–ppm 1.39	—

טבלה: כל התוצאות שנמדדו במאמר, עם הסעיף, המדגם ואי הוודאות של כל אחת.

שלוש שורות מראות כיצד הטבלה נקראת. בשורה השנייה, הברזל מעל 44 הכיפות הקבורות שונה מן הסביבה ב-0.19– אחוזי משקל, והמרווח, -0.37 עד +0.14, מכיל את האפס: מעל הכיפות הקבורות פני השטח זהים לקרקע שסביבן, כפי שכיסוי המונח מעליהן דורש; לשורה השלישית, של כיפות מתחת לים, יש מרווח שכולו מעל האפס. בשורת מרכז המגע, "0.02% העליונים" נובע מן הדירוג השלישי מתוך 16,200: שלושה מתוך 16,200 הם כשניים לעשרת אלפים. בשורת הקרקעיות שמעבר למגע מול המגע, "לפחות $25 \times$ " הוא הגבול התחתון, המתקיים ב-97 מכל 100 דגימות חוזרות (F.6§), של יחס שערכו הנמדד הוא $83 \times$.

המרווחים הם מרווחי bootstrap, כפי שצוין בכל דוח מקור; הם דוגמים מחדש יחידות, מכתשים או אזורים, ואינם ממדלים את המתאם המרחבי בין שכנים. מרווח bootstrap נמצא על ידי שליפה חוזרת של המדגם מתוך עצמו פעמים רבות, עם החזרה, וחישוב מחדש של התוצאה בכל פעם; הפיזור של התוצאות המחושבות מחדש נותן את המרווח. מכתשים או תאים שכנים על הירח אינם בלתי תלויים לגמרי, ומרווח המתייחס אליהם כבלתי תלויים יכול להיות צר במקצת מן האמת; במקום שבו המקור השתמש בתאים של 5° על 5° כיחידת הדגימה החוזרת, יש התחשבות באשכולות. במקום שבו נבדקו כמה מועמדים, כמו במקרה המפזר האחרון, התוצאה הטובה ביותר לבדה אינה נספרת כממצא. הסיבה היא שבין מועמדים רבים אחד יראה הטוב ביותר במקרה בלבד, כמו שבין מטבעות רבים שהוטלו עשר פעמים אחד יראה תשעה "עץ"; תוצאה נספרת רק אם נקבעה לפני הנתונים או שהיא מתקיימת לאורך כל המועמדים.

חלק M — תחזיות ומבחנים

הבעיה

מודל מוגדר על ידי מה שהוא מנבא ועל ידי האופן שבו כל תחזית נמדדת. **הגישה:** מה שהמדידות שינו במהלך העבודה מוצג בנפרד, וכל טענה מופיעה עם המבחן שלה.

חלק זה מרכז את התוצאה של המחקרים של המאמר ואת התחזיות שהם בודקים. יש בו שלושה סעיפים: הרעיונות שהמדידות שינו בדרך (M.1§), מצבו של כל מחקר במבט אחד (M.2§), וכל תחזית עם המבחן שלה (M.3§).

M.1 מה שהמדידות שינו

ארבעה רעיונות הוחזקו במהלך העבודה ושנו בעקבות מה שנמדד. הם מוצגים כאן בנפרד כדי שהקורא יראה אילו קריאות נבדקו ונזנחו, ומה בא במקומן. כל שורה נותנת את הרעיון, את המדידה ששינתה אותו ואת הקריאה שתפסה את מקומו.

רעיון	מה נמדד	מה זה שינה
שיא פשוט של מכתשים על כל שפה	אין טבעת כללית של מכתשים קטנים על השפות, כשהימות מוסרות משני הצדדים	טבעת השפה היא תכונה של הימות העשירות בחומרים נדיפים, לא של כולן (M.3§)
תעלה לאורך הדפנות של הימות	החלק הנמוך ביותר של הקרקעית בחציון של 0.57 מן הרדיוס; צמוד לדופן באף אחת מתוך 16	הקרקעית שוקעת פנימה מן הדופן, מעל הכיפה (E.2, F.1§)
זרם לבה הבונה את השוליים של הימות הרחוקות	בזלת על 0–7% מן הטבעת סביבן	השוליים נבנו בשכבות של החומר החוזר של הים עצמו (F.3§)
שטח הים כמדד להשלכה	השטח אינו מודד את מה שהושלך	סופרים את הפתחים, לא את הבזלת (חלק C)

טבלה: ארבעה רעיונות שהמדידות שינו, ומה בא במקומם.

השורה השנייה מראה את סוג השינוי: תעלה הייתה מציבה את החלק הנמוך ביותר של הקרקעית צמוד לדופן, ברדיוס קרוב ל-1; החציון הנמדד של 0.57 מציב אותו בערך באמצע הדרך פנימה, מעל הכיפה, וזה מה שהוביל לקריאה של מרכז ששקע (E.2§).

M.2 המחקרים בטבלה אחת

כל מחקר מקבל את צבע הרמזור שלו: ירוק במקום שבו ההשערה התקיימה במלואה, כתום במקום שבו חלק ממנה התקיים וחלק לא, אדום במקום שבו לא נתמכה. מה שלא התקיים מנוסח במחקר שלו ומרוכז כאן.

כיצד לקרוא את הרמזור. הרמזור שופט את ההשערה של המחקר כפי שנוסחה לפני המדידה, לא את המודל כולו. ירוק (ירוק בהיר בטבלה) פירושו שההשערה התקיימה במלואה על המדגם שנמדד. הטקסט שליד רמזור ירוק עשוי עדיין לציין מגבלה — מדגם קטן, חריג עם הסיבה שלו, או מבחן משנה שלא הפריד — כשהמגבלה

אינה סותרת את ההשערה. ענבר (כתום בטבלה) פירושו שההשערה התקיימה בחלק אחד ולא בחלק אחר; החלק שלא התקיים מצוין באותה שורה. אדום היה פירושו שההשערה לא נתמכה; אף מחקר במאמר הזה אינו אדום. מתוך חמישה-עשר המחקרים, שלושה-עשר ירוקים ושניים כתומים. המחקרים ממוספרים 1 עד 16; מחקר 14 בוטל, ושאר המספרים נשמרים כפי שהם.

רמזור	מחקר	מה התקיים, ומה לא
	1. הימות על כיפות ההזנה	33 מתוך 34 על כיפה, הרחק מעבר למקרה. ל-Ingenii, מעל South Pole–Aitken, אין כיפה משלו
	2. מבחן המקור	המכתשים נושאים את הברזל של הקרקע שלהם, היורד עם המרחק. גם המישורים נושאים הילה, של הנתך שנשפך מהם, היורדת לרמת הביקורות הרחק מהם
	3. אגן או מכתש: הקפיצה של הקרום	התקיים
	4. הכיפות הקבורות	התקיים
	5. המרכז שקע מעל הכיפה	10 מתוך 12 ימות פתוחות; Imbrium–Serenitatis, המוחזקות למעלה על ידי משיכת כדור הארץ, הן שני החריגים
	6. קרקעית אחת	16 מתוך 16 במפלס אחד, מתחת לשפה וליבשה; ימות המגע בגובה המישורים שלהן. Serenitatis נמצא מתחת למישורים שלו
	7. קרקעיות נקיות	כל קרקעית נקייה מן היבשה שלה בכל גודל
	8. גודל ומצב	מכתשים נעלמו לתוך הקרקעיות; השיעור המותך עולה עם הגודל; מכתשים קטנים חדים על המגע. הקרקעיות הגדולות של הימות הרחוקות מעטות
	9. טבעות של ברזל וטיטניום	העודף של הימות מגיע ל-600 ק"מ. שני המישורים הקטנים יותר שוכבים בין בזלות אחרות ונשארים גבוהים
	10. תוריום והמגע	המגע, שנקבע מראש, שלישי מתוך 16,200 מרכזים
	11. המסה הזרה	התקיים
	12. סדר הקפיאה	מסודר בכל גודל; ב-1–2 ק"מ רק בחולשה; ב-20–40 ק"מ שלוש הקרקעיות הקטנות שמעבר למגע אינן נושאות אף מכתש

13. תוריום וטיטניום	תוריום: כל ים של המגע עני יותר מן הקרקע שלו, הקרקעיות עניות בשליש מן המישורים שלהן. טיטניום: היחס בין תוריום לטיטניום יורד מעבר למגע באותה מידה כמו בתוכו, שם בגלל טיטניום עשיר יותר על הקרקעיות; Imbrium לבדו אינו מפריד, Copernicus H הפוך
15. המישורים של המגע	השפה אבדה, והרכס ששרד הוקהה, בצד של המישור החם רק במגע. הקרקעיות הקרובות לגובה הקרקע אינן מפרידות בין מישורי המגע לבין אלה שמעבר לו; ההשוואה המותאמת של צורת הרכס נשענת על ארבעה זוגות; המכתשים על Imbrium מעטים
16. הצווארון של הימות הרחוקות	סביב הימות הרחוקות, ובעיקר סביב הקבורות, מול הביקורת. סביב הימות הרחוקות הפתוחות לבדן הצווארון אינו נפרד מן הביקורת

טבלה: הרמזור של המחקרים — ירוק: ההשערה התקימה במלואה; כתום: חלק התקיים וחלק לא.

שתי השורות הכתומות מראות מה פירוש "חלק התקיים". במחקר 13 חלק התוריום התקיים: כל ים של המגע עני יותר בתוריום מן הקרקע שסביבו. חלק הטיטניום, שציפה שהיחס בין תוריום לטיטניום יורד יותר בתוך המגע מאשר מעבר לו, לא הפריד בין שני האזורים. במחקר 16 הצווארון עומד מעל הביקורת סביב הימות הרחוקות כשהן נלקחות יחד, ובבירור הרב ביותר סביב הקבורות; סביב הימות הרחוקות הפתוחות לבדן, 10 ימות עם חציון של 207 מ' (F.3§), הוא אינו נפרד מן הביקורת.

M.3 תחזיות ומבחנים

כל שורה בטבלה מנסחת טענה של המודל ואת המדידה שבודקת אותה. המבחנים כתובים כך שקורא עם הנתונים הציבוריים יוכל לבצע אותם; כמה מהם בוצעו במאמר הזה (הסעיפים מצוינים), והאחרים פתוחים.

תחזית	מבחן
ים הוא פתח מעל כיפת הזנה	כל שיא כבידה עגול בשדה מול הכיסוי שמעליו (C.3, D.4§)
הקרקעית שקעה מעל הכיפה	גובה המרכז מול עוצמת הכיפה (E.2§)
הימות הן המקור	ברזל וטיטניום של הקרקע מול המרחק מן הים (C.7, J.1§)
טבעת השפה של הימות העשירות בחומרים נדיפים	מכתשים קטנים על השפה, כשהימות מוסרות משני הצדדים, מול תכולת חומרים נדיפים שנמדדה (F.3§)
המפזר האחרון הוא כדור הארץ	מכתשים קטנים על הקרקעיות החלקות מול המרחק מן המגע, כשקרניים ומכתשים משניים מוסרים (F.6§)
חשיפה הדרגתית בתוך ים אחד	השתמרות מכתשים, מילוי ומבנה לאורך ים גדול, בכיוון החשיפה (I.3§)
אופי הפתח לפי האזור שלו	מסקון עם טבעת בחגורה, מסקון בלי טבעת במגע (D.6§)

סדר האטימה	הבזלת הצעירה ביותר של כל ים מול המרחק הזוויתי שלה ממרכז שנקבע לפני הנתונים, כשהתורים מוחזק קבוע
התורים של המגע	שיעור העודף בכיפות שמרכזן בכל נקודה על הירח; בתוך המגע — פתחים, מישורים ורמות בנפרד (J.3, J.4§)
אין מסה זרה באגנים	יסודות סידרופיליים בנתכים של כל אגן, לפי האיזוטופים שלהם (J.7§)
המנוע	שטף קריטי וזמני אטימה מול זמני החשיפה, משוואה (4) (H.3§)
חום מלמטה על מישורי המגע (G.6§)	צורת הרכס במדגם מותאם של המגע ושל מה שמעבר לו, בעומק פנימי שווה

טבלה: כל תחזית של המודל עם המבחן שלה.

חלק N — דיון

הבעיה

התיעודים של המאמר הזה חייבים לספר תהליך אחד. **הגישה:** מחברים אותם יחד, מציבים אותם מול ההסברים של הספרות, ומנסחים את התרומה.

כל אחד מן החלקים שלפני חלק זה קרא תיעוד אחד: הכבידה, הגובה של הקרקעיות, המכתשים, הכימיה. חלק זה שואל אם הם מספרים סיפור אחד, כיצד הסיפור הזה עומד מול ההסברים שכבר קיימים בספרות, ומה בו חדש.

N.1 התמונה המאוחדת

מערכת הזנה אחת, הנראית בחמישה תיעודים: הכבידה של הכיפות, הצורה של הקרקעיות, המכתשים עליהן וסביבן, הברזל והטיטניום של הקרקע, והתוריום. הפתחים נחשפו בסדר שקבע המגע המצטמצם; כל אחד עמד מעל כיפת הזנה שדרכה עלה החומר. כל עוד היו פתוחים, רוב הפתחים השליכו את החומר שיצר את המכתשים סביבם והניחו את ציפוי הברזל שלהם על היבשה, והקרקעיות שלהם עמדו בגובה השפה והתיזו; Imbrium ו-Serenitatis לא השליכו (רק פצפוצים קלים). כשהזנה נפסקה, הקרקעית קפאה במפלס אחד, והמרכז שקע מעל הכיפה הצפופה, העשירה בברזל; הגורמים האפשריים הם משקלה, יניקה ובעיקר התכווצות תרמית, החזקה יותר ככל שהמסה גדולה יותר, והם עוד לבדיקה. רוב הפתחים של הצד הרחוק פעלו מוקדם ונאטמו כשהאגס גדל ופחות מחום כדור הארץ הגיע אליהם; אחר כך כיסו אותם שכבות הסיאל והחומר החוזר שבנו את הצד הרחוק. בצד הקרוב הפתחים היו מעברים פתוחים שדרכם עבר הלחץ של כדור הארץ, וחום כדור הארץ שמר אותם חמים כל עוד הגוף היה מחובר; בשחרור פסקו הפליטות, והקרקעיות קפאו לאט מבחוץ פנימה; המגע, האחרון שהרפה, מחזיק את התוריום.

אפשר לעקוב אחר התמונה כרצף אחד בזמן. ככל שקצה האגס הצטמצם, האזור שעוד היה מחובר לכדור הארץ קטן, והפתחים שמחוץ לו נחשפו חגורה אחר חגורה, הצד הרחוק תחילה והמגע אחרון (חלק ו). כל פתח היה תעלה מעל כיפה: חומר עלה, וברוב הפתחים הושלך החוצה ונחת כחומר חוזר. כשפתח הפסיק להיות מוזן, הנוזל שלו קפא שטוח, כמו שאגם קופא, והמרכז שקע מעל הכיפה הצפופה שמתחתיו — במשקלה, ביניקה או, בעיקר, בהתכווצות תרמית. בצד הרחוק רוב הפתחים השליכו מוקדם ונאטמו כשהאגס גדל ופחות מחום כדור הארץ הגיע אליהם; אחר כך כיסו אותם השכבות שנבנו על הצד הרחוק, יחד עם המכתשים של תקופתם. בצד הקרוב הפתחים העבירו את הלחץ של כדור הארץ, וחום כדור הארץ שמר אותם חמים עד השחרור; אז הם קפאו לאט מבחוץ פנימה, במשך מאות מיליוני שנים עד 1–2 מיליארד.

N.2 ההסברים של הספרות

הטבלה מציבה כל אחד מן ההסברים העיקריים בספרות מול מה שהוא מסביר ומה שהוא משאיר בלי הסבר. העמודה האחרונה היא זו שיש לקרוא: היא מונה את התצפיות של המאמר הזה שההסבר אינו מגיע אליהן.

הסבר	מה הוא מסביר	מה הוא משאיר
------	--------------	--------------

אגן של גוף פוגע חיצוני, שהוצף מאוחר יותר	האגנים העגולים והמסקונים שלהם	המסה הזרה של הגופים, שהקרום אינו מחזיק; 44 הכיפות שלא נראה מעליהן אגן
החום של KREEP מתחת ל-Procellarum	התורים והבזלות הצעירות של הצד הקרוב	תורים המשותף לבזלת ולרמות בתוך המגע; בזלת בת 2.8 מיליארד שנה בצד הרחוק בלי תורים
געשיות הנשלטת על ידי אגנים	בזלת במקומות הנמוכים	מפלס אחד בכל יחידה; מרכזים שקועים רק מעל כיפות חזקות

טבלה: ההסברים העיקריים של הספרות — מה כל אחד מסביר ומה הוא משאיר.

מסקון הוא ריכוז של מסה מתחת לאגן, הנראה כשיא כבידה. KREEP הוא השם שהספרות נותנת לחומר עשיר באשלגן (K), ביסודות הנדירים (REE) ובזרחן (P), הנקרא כשארית האחרונה של אוקיינוס מאגמה שהתגבש, ונושא את רוב התורים (J.6§). שורת KREEP מראה כיצד הטבלה פועלת: אילו החום של KREEP הניע את הבזלות הצעירות של הצד הקרוב, התורים היה צריך ללכת אחרי הבזלת; בתוך המגע הוא אינו עושה זאת (J.4§), והבזלת של Chang'e-6, בת 2.8 מיליארד שנה, בצד הרחוק, נוצרה בלעדיו.

הריכוז של הימות בצד הקרוב והקרום הדק שלו מוסברים בשתי קריאות, ומבחן המראה רק שהימות שוכבות בצד הקרוב אינו מכריע דבר. מבחן מכריע בין שתי קריאות רק במקום שבו הן חוזות תוצאות שונות. המבחנים המכריעים הם הכיפות הקבורות, הקרקעיות שמעליהן, טבעות הברזל והמסה הזרה: גוף חיצוני אינו משאיר כיפה קבורה בלי אגן, אינו יוצר קרקעית במפלס אחד ששוקעת רק מעל כיפה חזקה, אינו מניח טבעת ברזל היורדת עם המרחק מן הים, והוא כן משאיר את המתכת שלו בנתך.

N.3 מה קיים ומה חדש

מכתשים משניים, העברת חומר והאסימטריה של הקרום ידועים. מכתשים משניים הם מכתשים שנוצרו מחומר שהושלך ממכתש גדול יותר ונחת שוב; העברת החומר על פני הירח, והקרום הדק יותר של הצד הקרוב, מבוססים זה מכבר. חדש כאן: הים המוגדר כפתח מעל כיפת הזנה, ונספר כך; הפתחים הקבורים של הצד הרחוק, שנמצאו בכבידה ונקראו יחד עם הכיסוי שמעליהם; הקרקעית ששקעה מעל הכיפה שלה; הים כמקור הנמדד של החומר החוזר; והתורים של המגע.

חלק 0 — מסקנות

הבעיה

מה המאמר הראה, לפי הסדר. **הדרך**: שורה אחת לכל תוצאה, עם החלק שנושא אותה. כל מסקנה שלהלן מציינת תחילה מה נמצא, ואחר כך מה משמעותו לתמונה של הימות; החלק או הסעיף המצוין בסוגריים הוא המקום שבו המדידה והמבחן שלה מוצגים במלואם.

המאמר יצא לענות על שאלה אחת: מהו ים, אם אינו אגן שנחפר על ידי גוף מבחוץ והוצף אחר כך בלבה? התשובה שלו היא שים הוא פתח מעל כיפת הזנה, וחלקי המאמר בחנו את התשובה הזאת בחמישה תיעודים בלתי תלויים — הכבידה, גובה הקרקעיות, המכתשים על הקרקעיות וסביבן, הברזל והטיטניום של הקרקע, והתוריום. שמונה המסקנות שלהלן הולכות בסדר הזה: ממה שים הוא, ועד לאן הלך החומר שלו ומה הקריאה המתחרה הייתה דורשת.

0.1 מה המאמר הראה

1. **ים הוא פתח מעל כיפת הזנה; הבזלת היא מה שנשאר על פני השטח שלו (חלקים A, C).** כיפת הזנה היא הגוף שנדחף כלפי מעלה ממוקד תת-קרקעי מתחת לפתח; דרכה עלה חומר לתוך הים, וברוב הפתחים הושלך החוצה וחלקו חזר אל פני השטח כחומר חוזר (Serenitatis-I Imbrium לא השליכו; Serenitatis רק פצפוצים קלים). *המשמעות*: מישור הבזלת הכהה שהספרות מונה כ"ים" הוא רק השכבה האחרונה שנשארה על ראש הפתח, ולא המבנה עצמו. לכן ים מזוהה לפי מה שמתחתיו, ולא לפי צבע פני השטח שלו.
2. **כשסופרים אותם כפתחים, הימות אינם נמצאים במקום שבו נמצאת הבזלת: 73 כיפות הזנה בכבידה, 44 מהן קבורות, 36 בצד הרחוק; 33 מתוך 34 הימות שזוהו על מפלי הכבידה יושבים על כיפה (חלקים C, D).** כיפות ההזנה הן רמות עגולות של שדה הכבידה של Bouguer — השדה שנשאר אחרי שמסירים את המשיכה של הטופוגרפיה הנראית, כך שהוא מראה חומר צפוף מתחת לפני השטח. 34 הימות הם אלה של נספח A; הים היחיד שאינו יושב על כיפה הוא Ingenii, שכיפתו נמחקה בחום מתחת ל-South Pole-Aitken. בתוך 20,000 קבוצות של 34 נקודות שהוצבו באקראי, אף אחת לא הגיעה ל-33 (מחקר 1). המבחן של הקרום ב-D.28 נעשה על 36 הנקודות שהמחבר סימן בעין; נספח A מסביר כיצד הסימונים האלה קשורים ל-34 הימות. מתחת למרכז של פתח הקרום דק יותר מאשר בטבעת שסביבו, ב-29 מתוך 36 הפתחים המסומנים, לעומת 4 מתוך 169 מכתשים רגילים (מחקר 3). *המשמעות*: הבזלת היא מורה דרך גרוע למיקום הפתחים. רוב כיפות ההזנה אינן נושאות בזלת, ורובן נמצאות בצד הרחוק; ההבדל בין הצד הקרוב לצד הרחוק הוא הבדל במה שמכסה את הפתחים, ולא במספרם.
3. **מעל הכיפות הקבורות הברזל והתוריום שווים לאלה של הקרקע שסביבו, והקרום עבה יותר ב-8–13 ק"מ: השכבות כיסו אותן, יחד עם המכתשים שלהן (D.58).** *המשמעות*: כיפה קבורה נושאת על פני השטח שלה אותה שכבה כמו הקרקע שסביבה, והקרום הנוסף מעליה הוא העובי של השכבה הזאת. הפתחים האלה היו פעילים מוקדם, כוסו אחר כך, והמכתשים שנוצרו בזמנם כוסו יחד איתם. הצד הרחוק, העשיר בכיפות קבורות, מתעד פעילות חזקה של פתחים בשלבים המוקדמים.
4. **כל קרקעית היא מפלס אחד, כ-3 ק"מ מתחת לשפתה (חציון 3.4 ק"מ) וחציון של 1.6 ק"מ מתחת לקרקע שסביבה; המרכז של ים פתוח שקע מעל הכיפה שלו ב-10 מתוך 12, וככל שהכיפה חזקה יותר**

כן יותר; השניים שלא שקעו הם הימות הגדולים של המגע, שקפאו תחת המשיכה של כדור הארץ (חלקים E, F). הקרקעית של כל ים היא משטח אחד, שקפא כמו אגם; בכל 16 הקרקעיות שנמדדו היא נמצאת מתחת לשפתה ומתחת לקרקע שסביבה, דבר שבמקרה היה קורה פעם אחת ב-65,000. בימות הפתוחים המרכז נמוך מן השוליים (חציון 267 – מ'), ומקדם המתאם הדרגתי בין עוצמת הכיפה לבין גובה המרכז הוא $\rho = -0.59$. המשמעות: הקרקעית לא נבנתה זרימה אחר זרימה מבחוץ; היא קפאה כגוף אחד מעל הכיפה שלה, והמרכז שקע מעל הכיפה הצפופה, העשירה בברזל, שמתחתיה; הגורמים האפשריים – משקלה, יניקה ובעיקר התכווצות תרמית – עוד לבדיקה. Imbrium ו-Serenitatis, היוצאים מן הכלל, נמצאים במגע, שם המשיכה של כדור הארץ החזיקה את הצד הקרוב כלפי חוץ בזמן שהם קפאו.

5. הימות הם המקור של החומר החוזר: הקרקע סביב כל אחד מהם נושאת את הברזל והטיטניום שלו, מ-6.9 עד 3.1 אחוזי משקל FeO בתוך 150 ק"מ, עם עודף עד 600 ק"מ; ליד המישורים העודף הוא הנתך שנשפך מהם, והוא אינו מגיע רחוק כל כך (חלקים C, J). הקרקע הרחוקה מכל ים, קבוצת הביקורת, מכילה כ-2.3 אחוזי משקל FeO; סביב ששת הימות הברזל נשאר מעל הרמה הזאת לכל אורך הדרך עד 600 ק"מ. סביב המישור של Procellarum הברזל יורד חזרה לרמה של קבוצת הביקורת בטווח 300–600 ק"מ. המשמעות: חומר שהושלך מכל ים ירד על הקרקע שסביבו, עבה ביותר ליד הים ומתדלדל עם המרחק – הסימן של מקור, ולא של מטרה. מישור, שלא היה לו ערוץ לעומק, נושא רק את הנתך שנשפך משוליו, וזה אינו מגיע רחוק.

6. הקרקעיות של הימות הפתוחים נקיות: חלק שנים-עשר בלבד ממספר המכתשים בגודל 2–5 ק"מ שעל הקרקע שסביבן; הנקיות ביותר הן הימות של המגע (F.5§). ההשוואה היא של שווה מול שווה: הבזלת מוסרת מן הקרקע, ושדות הקרניים של מכתשים צעירים מוסרים משני הצדדים. המשמעות: ים פתוח ממיס או בולע את מה שנוחת עליו ואינו שומר מכתשים; קרקעית אוספת מכתשים רק אחרי שקפאה. לכן מספר המכתשים על קרקעית מסדר את הקרקעיות לפי זמן הקפיאה שלהן, והימות של המגע, Imbrium ו-Serenitatis, קפאו אחרונים. המכתשים שהם נושאים נוצרו מאוחר יותר על ידי המפזר האחרון, כדור הארץ, שאחרי השחרור המשיך להשליך חומר לעבר הירח מכל הצדדים.

7. דיסקת המגע, 17.5% משטח הפנים, מכילה 95% מן התוריום שמעל 3 ppm; המרכז שלה, שנקבע מראש, הוא השלישי מבין 16,200 מרכזים אפשריים, 47 ק"מ מן הטוב ביותר. בתוכה המישורים והרמה נושאים כמעט אותו תוריום, והימות – הכי מעט (חלק J). המגע הוא האזור שבו הירח נגע בכדור הארץ בפעם האחרונה; המרכז שלו נקבע על ידי הגאומטריה של מאמר 3 לפני שהתוריום נקרא. כיפה כדורית באותו גודל הוזזה על פני הירח כולו, וכמעט אין מרכז אחר שתופס יותר. המשמעות: התוריום שייך לאזור המגע האחרון, ולא לבזלת: המישור והרמה בתוך הדיסקה נושאים כמות כמעט שווה. הימות של המגע, הערוצים לעומק, הם העניים ביותר, משום שהנוזל האחרון שנשא תוריום שקע בחזרה דרכם.

8. האגנים של הימות, כשקוראים אותם כתוצאה של גופים פוגעים מבחוץ, דורשים מסה זרה שהנתכים שלהם אינם נושאים (J.7§). כשקוראים אותם במונחים של הספרות עצמה, האגנים של הימות דורשים כ- 10^{19} ק"ג של חומר זר; ואולם הנתכים של Imbrium אינם תואמים אף קבוצה ידועה של כונדריטים, ועיקר היסודות הסידרופיליים של הקרום – יסודות "אוהבי ברזל", שבדרך כלל שוקעים לליבה ולכן נדירים בקרום – כבר היה במקומו לפני Imbrium ו-Serenitatis. המשמעות: הקריאה של הימות כאגנים שנחפרו על ידי גופים מבחוץ משאירה מסה שצריך למצוא; במודל אין מסה כזאת למצוא, משום שהאגנים הם פתחים, ושום גוף זר לא היה מעורב.

יחד, שמונה התוצאות מתארות מערכת הזנה אחת הנראית בחמישה תיעודים. הפתחים נחשפו בסדר שנקבע על ידי המגע ההולך ומצטמצם, כל אחד מעל כיפת ההזנה שלו; כל קרקעית קפאה כמפלס אחד ושקעה מעל הכיפה שלה; רוב הפתחים הרחוקים נאטמו מוקדם וכוסו אחר כך בשכבות של הצד הרחוק; הפתחים בצד הקרוב העבירו את הלחץ של כדור הארץ כל עוד הירח היה מחובר, הפליטות שלהם פסקו בשחרור, והקרקעיות שלהם

קפאו לאט אחריו; והתוריום מסמן את מקום המגע האחרון. המבחנים המכריעים הם הכיפות הקבורות, הקרקעיות שמעליהן, טבעות הברזל והמסה הזרה.

עבודה נוספת – פתחים למחקר

שבעת הפריטים שלהלן הם המקומות שבהם המדידה הבאה תחזק את התמונה או תבחן אותה. כל אחד מנוסח כמה שיש למדוד; המנוע, טבעת השפה וסדר האטימה מוצגים גם כדרישה או כתחזית בחלק M.

- המנוע.** השטף הקריטי וזמני האטימה של הפתחים, מול זמני החשיפה שלהם. פתח נאטם כאשר זרימת הנתך דרכו יורדת מתחת לרמה שבה החום שהיא מביאה כבר אינו מאזן את ההתקררות שלו (H.3§). חישוב הרמה הזאת, והצבת הזמן שבו כל פתח נאטם מול הזמן שבו נחשף, הופכים את התנאי של I.6§ למספר עבור כל ים.
- טבעת השפה.** מכתשים קטנים על השפות מול תכולת נדיפים מדודה, עבור כל ים. החומרים הנדיפים הקלו את הנתך ודחפו החוצה מן הימות את החומר שבנה את השוליים שלהם (H.2§). המדידות לא הראו טבעת של מכתשים קטנים על כל שפה; הטבעת צפויה רק בימות העשירים בנדיפים (M.1§). המבחן הוא המכתשים הקטנים על כל שפה, כשהימות מוסרים משני הצדדים, מול תכולת נדיפים מדודה (F.3, §M.3§).
- המפזר האחרון.** מכתשים קטנים על הקרקעיות החלקות, כשהקרניים והשדות המשניים מוסרים, מול המרחק מכל מועמד. המודל מצביע על כדור הארץ כמפזר האחרון (F.6§); ספירה לפי מרחק מכל מקור מועמד תראה אם מקור אחר כלשהו השאיר מפל על הקרקעיות.
- האיזוטופים של האגנים.** איזוטופים של רותניום ושל אוסמיום בנתכים של כל אגן של הימות. האיזוטופים האלה מבחינים בין גוף זר לבין חומר של מערכת כדור הארץ-ירח; כשמודדים אותם אגן אחר אגן, הם בוחנים ישירות אם קיימת מסה זרה כלשהי (J.7§).
- התוריום ברזולוציה גבוהה.** מפת התוריום המשוחזרת ב-26 ק"מ מעל כיפות ההזנה. למפה המסלולית שבה נעשה שימוש כאן יש תאים של חצי מעלה; מפה חדה יותר תראה אם התוריום נמוך ביותר בדיוק מעל הערוצים, כפי ש-J.6§ דורש.
- סדר האטימה.** הבזלת הצעירה ביותר של כל ים מול מרכז שנקבע מראש, כשהתוריום מוחזק קבוע. אם הימות של המגע נאטמו אחרונים, הבזלת הצעירה ביותר צריכה להיעשות צעירה יותר ככל שמתקרבים למרכז המגע (K.2, §M.3§).
- הקרניים והתקררות הקרקעיות בצד הקרוב (הצעת המחבר).** הימות של הצד הקרוב נשארו נזוליות זמן רב, מחוממות בחום הפנימי של הירח ובחום של כדור הארץ; מישורי הבזלת, כמו Oceanus Procellarum, שבו נמצאים Copernicus, Aristarchus ו-Kepler, היו חשופים לאותו חום גדול של כדור הארץ, ובכך הם דומים מאוד לקרקעיות הימות. חומר שנחת על הקרקעיות האלה בזמן שהיו חמות איבד את הרישום שלו. המחבר מציע שקרניים נוצרות רק כאשר חומר נוחת על קרקעית שכבר התקררה; על קרקעית חמה הן אינן נוצרות כלל. הקרניים הן רישום בתוך הקרקע שמתחת לפני השטח, ולא חומר המונח עליה. ככל שהקרקעיות התקררו הן החלו לשאת קרניים: כשהתקררו, נחתו עליהן בעוצמה Copernicus, Aristarchus ו-Kepler, והשאירו את הקרניים דמויות העכביש; Delisle ו-Diophantus נחתו כשהקרקעית עוד לא קפאה לגמרי, ולא השאירו קרניים; רבים אחרים נחתו על קרקעית חמה ולא השאירו רישום. המחקר: לספור את המכתשים הקטנים והבינוניים בצד הקרוב, על הימות ועל מישורי הבזלת, עם קרניים ובלעדיהן. המחבר מצפה שאלה שבלי קרניים יהיו רבים מאלה שעם קרניים, כי כמות החומר שנחת על הירח קטנה ככל שהירח התרחק.

זמינות הקוד

כל התוצאות המספריות של המאמר הזה משוחזרות על ידי הסקריפטים של חבילת השחזור של LEF (Python 3, numpy, scipy) יחד עם הקלטים שלהם, המופקדים עם הסדרה ב-doi:10.5281/zenodo.22743615.

- Nelson, D. M., Koeber, S. D., Daud, K., Robinson, M. S., Watters, T. R., Banks, M. E., & Williams, N. R. (2014). Mapping lunar maria extents and lobate scarps using LROC image products. *45th Lunar and Planetary Science Conference*, abstract 2861
- Goossens, S., Fernández Mora, Á., Heijkoop, E., & Sabaka, T. J. (2021). Patched local lunar gravity solutions using GRAIL data. *Earth and Space Science*, 8, e2021EA001695. DOI: .10.1029/2021EA001695
- Otake, H., Ohtake, M., & Hirata, N. (2012). Lunar iron and titanium abundance algorithms based on SELENE (Kaguya) Multiband Imager data. *43rd Lunar and Planetary Science Conference*, abstract .1905
- Lawrence, D. J., Elphic, R. C., Feldman, W. C., Prettyman, T. H., Gasnault, O., & Maurice, S. (2003). Small-area thorium features on the lunar surface. *Journal of Geophysical Research: Planets*, .108(E9), 5102. DOI: 10.1029/2003JE002050
- Robbins, S. J. (2019). A new global database of lunar impact craters >1–2 km: 1. Crater locations and sizes, comparisons with published databases, and global analysis. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 124, 871–892. DOI: 10.1029/2018JE005592
- Wang, Y., Wu, B., Xue, H., Li, X., & Ma, J. (2021). An improved global catalog of lunar impact craters (≥ 1 km) with 3D morphometric information and updates on global crater analysis. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 126, e2020JE006728. DOI: 10.1029/2020JE006728
- Barker, M. K., Mazarico, E., Neumann, G. A., Zuber, M. T., Haruyama, J., & Smith, D. E. (2016). A new lunar digital elevation model from the Lunar Orbiter Laser Altimeter and SELENE Terrain Camera. *Icarus*, 273, 346–355. DOI: 10.1016/j.icarus.2015.07.039
- Li, Q.-L., et al. (2021). Two-billion-year-old volcanism on the Moon from Chang'e-5 basalts. *Nature*, 600, 54–58. DOI: 10.1038/s41586-021-04100-2
- Zhang, Q. W. L., et al. (2025). Lunar farside volcanism 2.8 billion years ago from Chang'e-6 basalts. *Nature*
- Neumann, G. A., et al. (2015). Lunar impact basins revealed by Gravity Recovery and Interior Laboratory measurements. *Science Advances*, 1, e1500852. DOI: 10.1126/sciadv.1500852
- Andrews-Hanna, J. C., et al. (2014). Structure and evolution of the lunar Procellarum region as revealed by GRAIL gravity data. *Nature*, 514, 68–71. DOI: 10.1038/nature13697
- Schultz, P. H., & Crawford, D. A. (2016). Origin and implications of non-radial Imbrium Sculpture on the Moon. *Nature*, 535, 391–394. DOI: 10.1038/nature18278
- Liu, J., Sharp, M., Ash, R. D., Kring, D. A., & Walker, R. J. (2015). Diverse impactors in Apollo 15 and 16 impact melt rocks: evidence from osmium isotopes and highly siderophile elements. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 155, 122–153. DOI: 10.1016/j.gca.2015.02.004

- Murase, T., & McBirney, A. R. (1970). Viscosity of lunar lavas. *Science*, 167, 1491–1493. DOI: [S14]
.10.1126/science.167.3924.1491
- Hiesinger, H., Head, J. W., Wolf, U., Jaumann, R., & Neukum, G. (2011). Ages and stratigraphy [S15]
of lunar mare basalts: a synthesis. In *Recent Advances and Current Research Issues in Lunar
.Stratigraphy*, Geological Society of America Special Paper 477, 1–51
- Du, J., Fa, W., Wieczorek, M. A., et al. (2019). Thickness of lunar mare basalts: new results [S16]
based on modeling the degradation of partially buried craters. *Journal of Geophysical Research:
.Planets*, 124, 2430–2459. DOI: 10.1029/2018JE005872
- Whitten, J. L., & Head, J. W. (2015). Lunar cryptomaria: physical characteristics, distribution, [S17]
.and implications for ancient volcanism. *Icarus*, 247, 150–171. DOI: 10.1016/j.icarus.2014.09.031
- Mustard, J. F., Li, L., & He, G. (1998). Nonlinear spectral mixture modeling of lunar multispectral [S18]
data: implications for lateral transport. *Journal of Geophysical Research*, 103. DOI:
.10.1029/98JE01901
- Wieczorek, M. A., et al. (2013). The crust of the Moon as seen by GRAIL. *Science*, 339, 671– [S19]
.675
- .Melosh, H. J., et al. (2013). The origin of lunar mascon basins. *Science*, 340, 1552–1555 [S20]
- Solomon, S. C., & Head, J. W. (1980). Lunar mascon basins: lava filling, tectonics, and [S21]
.evolution of the lithosphere. *Reviews of Geophysics*, 18, 107–141
- Jolliff, B. L., Gillis, J. J., Haskin, L. A., Korotev, R. L., & Wieczorek, M. A. (2000). Major lunar [S22]
crustal terranes: surface expressions and crust–mantle origins. *Journal of Geophysical Research*,
.105, 4197–4216
- Zhu, M.-H., Artemieva, N., Morbidelli, A., Yin, Q.-Z., Becker, H., & Wünnemann, K. (2019). [S23]
Reconstructing the late-accretion history of the Moon. *Nature*, 571, 226–229. DOI: 10.1038/s41586-
.019-1359-0
- Shearer, C. K., et al. (2006). Thermal and magmatic evolution of the Moon. *Reviews in* [S24]
. *Mineralogy and Geochemistry*, 60, 365–518. DOI: 10.2138/rmg.2006.60.4
- Gong, S., Wieczorek, M. A., Nimmo, F., Kiefer, W. S., Head, J. W., Huang, C., Smith, D. E., & [S25]
Zuber, M. T. (2016). Thicknesses of mare basalts on the Moon from gravity and topography. *Journal of
.Geophysical Research: Planets*, 121, 854–870. DOI: 10.1002/2016JE005008
- Barker, M. K., Mazarico, E., Neumann, G. A., Zuber, M. T., Haruyama, J., & Smith, D. E. (2016). [S26]
A new lunar digital elevation model from the Lunar Orbiter Laser Altimeter and SELENE Terrain
.Camera. *Icarus*, 273, 346–355. DOI: 10.1016/j.icarus.2015.07.039

נספח A — קטלוג הפתחים

34 הימות של המאמר הזה, כפי שזוהו על ידי המחבר על המפלים של שדה הכבידה של Bouguer מ-GRAIL, עם כיפת ההזנה שמתחת לכל אחד מהם (C.2§). שדה Bouguer הוא הכבידה שנשארת אחרי שמסירים את המשיכה של הטופוגרפיה הנראית; המפלים שלו מראים את השוליים של גופים צפופים מתחת לפני השטח, ועל השוליים האלה סומנו הימות, ולא על הבזלת הכהה. המספרים הם אלה של הסימון המקורי; סימונים שנמצא שאינם ימות הוסרו, וארבעה ימות נוספו אחרי בדיקה של הכיפות החזקות שנשארו בלי סימון (37–40). האזור נקבע לפי הגאומטריה של מאמר 3: המגע — 3,000 הק"מ האחרונים של הקצה (בתוך 1,500 ק"מ מ- 24.1° צפון, 135.2° מזרח), דור III; הגבעה — בסיס הבליטה, ברוחב 6,000 ק"מ (בתוך 3,000 ק"מ מ- 16.6° צפון, 13.1° מזרח), דור II; ומעבר להן — דור I. הדור מציין מתי נחשף פתח: דור I, בצד הרחוק, היה חשוף מן ההתחלה; דור II, בחגורה, נחשף כשהמגע הצטמצם; דור III, בדיסקת המגע, נחשף לקראת השחרור (I.4§). העמודה "תת-ארץ" נותנת את המרחק הזוויתי מנקודת תת-הארץ — הנקודה על הירח של היום הפונה אל כדור הארץ.

הערה

כיצד לקרוא את הקטלוג. כיצד סומנו הפתחים. המחבר סימן את הפתחים בעין, כנקודות על המפלים של שדה הכבידה של Bouguer מ-GRAIL כפי שהוא מוצג ב-QuickMap, ומספר אותם מ-1 עד 36; נקודה 35 היא Copernicus H ונקודה 36 היא Sinus Aestuum. הנקודות המסומנות האלה הן הפתחים שעליהם נעשית הסטטיסטיקה של המאמר, כמו במבחן הקרום של D.2§ (מחקר 3). הקטלוג מונה את 34 הימות. הוא שומר על המספרים של הסימון המקורי, ולכן הפערים ברצף (2, 8, 14, 15, 22, 31) הם סימונים שנמצא שאינם ימות והוסרו; ארבעת הימות שמספרם 37–40 נוספו מאוחר יותר, אחרי בדיקה של כיפות ההזנה החזקות שנשארו בלי סימון.

העמודות. #: המספר בסימון המקורי. **פתח:** שם הים או האגן; כשאינו שם — המיקום שלו. **רוחב, אורך מז':** קו הרוחב וקו האורך המזרחי של הנקודה המסומנת, במעלות (קווי רוחב דרומיים שליליים; קו האורך נספר מזרחה מ- 0° עד 360°). **תת-ארץ:** המרחק הזוויתי מנקודת תת-הארץ, הנקודה על הירח של היום הפונה אל כדור הארץ; מתחת ל- 90° הפתח נמצא בצד הקרוב, מעל לכך — בצד הרחוק. **אזור (דור):** המגע, הגבעה או מעבר להן, עם דור החשיפה, II, III או (I.4§). **כיפת ההזנה שמתחת:** המזהה של כיפת ההזנה בשדה של GRAIL בדרגות 6–660, והקוטר שלה; "נמחקה בחום מתחת ל-SPA" מסמן את הימות שמעל South Pole–Aitken, שהכיפה שלהם נמחקה על ידי החום מתחת לאגן הזה. **כיסוי:** מה שמונח היום מעל הכיפה, לפי צבע — כחול, מתחת לים (הכיפה פתוחה, ועליה בזלת); ענבר, חלקי; אדום, קבורה (רמה בהירה מכסה את הכיפה); אפור, מעל SPA.

על מה להסתכל. השורות הכחולות מתקבצות במגע ובגבעה; השורות האדומות, הכיפות הקבורות, נמצאות ברובן מעבר להן, במרחקי תת-ארץ שמעל 90° . זו התוצאה של D.4§ בטבלה אחת: הצד הרחוק מכיל פתחים כמו הצד הקרוב, אבל מכוסים.

#	פתח	רוחב	אורך מז'	תת-ארץ	אזור (דור)	כיפת ההזנה שמתחת	כיסוי
1	Serenitatis		26	18	31° המגע (III)	M660_008, 610 ק"מ	מתחת לים

מתחת לים	M660_006, 518 ק"מ	36° הגבעה (II)	33	-16	Nectaris 3
מתחת לים	M660_003, 474 ק"מ	62° הגבעה (II)	60	18	Crisium 4
חלקי	M660_009, 319 ק"מ	86° הגבעה (II)	83	57	Humboldtianu 5 m
מתחת לים	M660_007, 450 ק"מ	86° הגבעה (II)	86	-3	Smythii 6
קבורה	M660_032, 149 ק"מ	110° מעבר להן (I)	113	-31	Milne 7
קבורה	M660_029, 128 ק"מ	142° מעבר להן (I)	142	5	Mendeleev 9
מתחת לים	M660_002, 313 ק"מ	140° מעבר להן (I)	149	26	Moscoviense 10
מתחת לים	M660_035, 209 ק"מ	120° מעבר להן (I)	163	-58	Poincaré 11
מעל SPA	— (נמחקה בחום מתחת ל- SPA)	146° מעבר להן (I)	169	-33	Ingenii 12
קבורה	M660_005, 323 ק"מ	162° מעבר להן (I)	176	17	Freundlich– 13 Sharonov
קבורה	M660_021, 287 ק"מ	129° מעבר להן (I)	183	51	Cooper K 16
קבורה	M660_023, 346 ק"מ	151° מעבר להן (I)	191	26	— (26.4° צפון, 191.4° מזרח) 17
קבורה	M660_027, 214 ק"מ	155° מעבר להן (I)	202	14	Dirichlet– 18 Jackson
קבורה	M660_031, 164 ק"מ	157° מעבר להן (I)	202	-5	Korolev 19
מעל SPA	— (נמחקה בחום מתחת ל- SPA)	134° מעבר להן (I)	209	-37	Apollo 20
קבורה	M660_048, 106 ק"מ	116° מעבר להן (I)	214	59	Birkhoff 21
קבורה	M660_012, 307 ק"מ	128° מעבר להן (I)	232	2	Hertzprung 23
קבורה	M660_013, 313 ק"מ	109° מעבר להן (I)	239	50	Coulomb– 24 Sarton
קבורה	M660_022, 124 ק"מ	94° הגבעה (II)	265	34	Lorentz 25
מתחת לים	M660_001, 435 ק"מ	95° מעבר להן (I)	265	-19	Orientale 26
קבורה	M660_004, 286 ק"מ	93° מעבר להן (I)	266	-49	Mendel– 27 Rydberg
מתחת לים	M660_011, 182 ק"מ	68° הגבעה (II)	292	-5	Grimaldi 28

SPA מעל	— (נמחקה בחום מתחת ל- (SPA	82° מעבר להן (I)	293	-68	Bailly 29
חלקי	,M660_016 ק"מ 255	67° הגבעה (II)	294	-16	Crüger–Sirsalis 30
קבורה	,M660_014 ק"מ 909	67° הגבעה (II)	316	-57	Schiller– Zucchius 32
מתחת לים	,M660_010 ק"מ 375	46° הגבעה (II)	320	-25	Humorum 33
מתחת לים	,M660_015 ק"מ 671	42° המגע (III)	341	38	Imbrium 34
מתחת לים	,M660_042 ק"מ 170	19° המגע (III)	342	6	Copernicus H 35
מתחת לים	,M660_020 ק"מ 235	13° המגע (III)	352	10	Sinus Aestuum 36
קבורה	,M660_024 ק"מ 153	100° מעבר להן (I)	132	-75	Schrödinger 37
קבורה	,M660_026 ק"מ 239	106° מעבר להן (I)	251	-28	Oriente Southwest 38
קבורה	,M660_025 ק"מ 185	104° הגבעה (II)	107	34	Szilard North 39
קבורה	,M660_030 ק"מ 108	70° הגבעה (II)	70	-16	Balmer- Kapteyn 40