

THE LEF MODEL · A SERIES OF TWELVE PAPERS

Lunar Elevation & Fission

6. המכתשים

מכתשים בלי אסטרואידיים

חלקים A-Q · נספח



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 שואל אם חומר שהושלך מתוך הגוף המתהווה ונפל חזרה עליו יכול לנחות בעוצמה מספקת כדי ליצור מכתשים. התשובה תלויה בכמה גדלים — המסה שמושכת את החומר חזרה, הרדיוס שממנו הוא מושלך, הסיבוב של פני השטח, מהירות ההשלכה — ובמה שכל אחד מהם אמור לייצג. הטבלה קובעת אותם פעם אחת. השורות העליונות שלה מגדירות את השלב ואת מקור החומר המושלך; השורות האמצעיות נותנות את המספרים של הדוגמה המחושבת שמשמשת לאורך חלקים J ו-K; השורות התחתונות אומרות מהי המטרה, כיצד מחושב ההלם, ואילו מספרים של הסדרה אינם משמשים כאן.

גודל או תנאי	ההגדרה במאמר הזה
שלב הבנייה	הקליפה החיצונית עדיין חשופה — שטוחה מעל ההזנה, או על צלע הכיפה העולה; ההשלכה וההתרוממות חופפות בזמן
מקור ההשלכה	פנים כדור הארץ, שהלחץ והחומר שלו עברו דרך האגס אל הפתחים שבקליפה (מאמר 3); החומר אינו מוגדר כחומר שנתלש מהקליפה
מסת גוף האם המוקדמת	$M_0 = 6.0455 \times 10^{24}$ ק"ג, כולל מסת הירח העתידי
קבוע הכבידה	$G = 6.674 \times 10^{-11} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1} \text{ s}^{-2}$
רדיוס ההשלכה בדוגמה	$r_0 = 6,721$ ק"מ; השלכה רדיאלית מקו המשווה של פני השטח המסתובבים
הסיבוב בדוגמה	5.5 שעות, קבוע במהלך מעוף יחיד; אין הנחה שהוא נשאר קבוע לאורך כל הבנייה
מודל השדה	מונופול ארצי קפוא בזמן, $K = GM_0$; לא פתרון השדה של גוף מחובר מפותח
מצב תרמי וחומרים נדיפים	מקור חם ועשיר בחומרים נדיפים בתרחיש; האטמוספירה ומצב הפאזה אינם נמדדים כאן
מהירות ההשלכה	פרמטר בדיקה, לא תוצר מוכח של לחץ המקור; נבדקות מהירויות של 2–8 ק"מ/ש'
פני השטח של המטרה	חלק חיצוני חזק יחסית מעל בסיס נייד; תנאי השימור המלאים נמצאים במאמר 3
קלט ההלם	בזלת צפופה בצפיפות ייחוס של 2,700 ק"ג/מ"ק, לנחיתת ייחוס; אינה מזוהה עם מאגמה מוקצפת
קצב ומשך	אין משך השלכה מדוד; חלון 600 מיליון השנים של הסדרה אינו זמן המעוף, ואינו מתוארך מספירת מכתשים
שלבים מאוחרים	מרחקי מרכז של כ-17,570/17,631 ק"מ שייכים למצבים המצומדים של מאמר 2; הם אינם הרדיוס של פני השטח שמקבלים את הנחיתות

טבלת הסביבה החישובית של מאמר 6.

כמה שורות דורשות מילת הסבר. **השלב והמקור.** במודל LEF הירח לא הושלך מוגמר: הוא נבנה כגוף שעמד על כדור הארץ, על קצה של המשך ארוך מחומרו של כדור הארץ עצמו, האגס, והוזן מבפנים דרך פתחים

בקליפה שלו (מאמר 3). לפני שהגוף התרומם, הקליפה החיצונית העתידית שלו הייתה מונחת על גוף האם כחלק מפני השטח שלו; כשההזנה שמתחתיה דחפה מעלה, הקליפה נעשתה פני השטח של כיפה עולה. המכתשים של המאמר הזה נוצרו על הקליפה הזו כשהיא עדיין הייתה פתוחה לשמיים — תחילה כשהייתה שטוחה מעל ההזנה, ואחר כך על צלעות הכיפה — והקליפה נשאה אותם מעלה איתה. החומר שיצר אותם בא מלמטה, מפנים כדור הארץ, שהלחץ והחומר שלו עברו דרך האגס אל הפתחים; הוא לא בא מחתיכות שנשברו מהקליפה עצמה.

המסה, הרדיוס והסיבוב. M_0 היא המסה של כדור הארץ ושל הירח העתידי יחד, שכן בשלב הזה חומר הירח עדיין לא עזב. רדיוס ההשלכה של 6,721 ק"מ, מעט גדול מהרדיוס של כדור הארץ של היום (6,371 ק"מ), הוא המרחק מהמרכז שממנו מושלך החומר בדוגמה, והיממה של הדוגמה אורכה 5.5 שעות. פני שטח מסתובבים מטילים כל מה שעליהם מעט החוצה, ולכן המשיכה שגוף מושלך מרגיש ברדיוס הזה קטנה במקצת מהמשיכה של המסה לבדה; עם הערכים האלה היא 8.25 מ"ש² (J.38). הסיבוב מוחזק קבוע רק לדקות או לשעות של מעוף אחד; שום דבר אינו מונח לגבי האופן שבו הוא השתנה לאורך הבנייה כולה.

השדה. שדה מונופול הוא המשיכה של מסה המרוכזת בנקודה: הוא תלוי רק במרחק מהמרכז. $K = GM_0$ הוא עוצמת המשיכה הזו. גוף האם האמיתי לא היה נקודה ולא היה בלתי משתנה, ומרגע שהגוף עמד עליו השדה היה שדה של שתי מסות מחוברות; המונופול הוא השדה הפשוט ביותר שבו אפשר לעקוב אחר המעוף במדויק, וחלקים J ו-K אומרים היכן הוא חדל לחול.

מהירות ההשלכה. המהירות u שבה החומר עוזב את הפתח מטופלת כחוגה, שמכוונת בתורה ל-2, 3, 5 ו-8 ק"מ/ש', וכל כיוון נעקב עד לנחיתה שלו. המאמר אינו טוען שגזר אותה מהלחץ של המקור; מה שהמקור חייב לספק כדי להגיע אליה מנוסח כדרישה (J.18).

המטרה וההלם. פני השטח שמקבלים את הנחיתות הם שכבה חיצונית חזקה מעל בסיס רך ונייד יותר — חזקה מספיק כדי להחזיק מכתש, ונישאת מעלה על ידי מה שמתחתיה. לצורך הלחץ ברגע הנחיתה, גם החומר המגיע וגם המטרה נלקחים כבזלת צפופה של 2,700 ק"ג/מ"ק, מקרה ייחוס שתכונות ההלם שלו נמדדו היטב; אין בכך טענה שהחומר המגיע היה בזלת צפופה ולא קצף של התך וגז.

הזמנים והמרחקים. 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. החלון הזה הוא הזמן שבו נוצרו רוב המכתשים; אחרי השחרור הוסיף כדור הארץ מכתשים קטנים ובינוניים מהטיפות שהתיז (חלק M). החלון אינו הזמן שנמשך מעוף יחיד, והוא אינו נקרא מספירות מכתשים. הירח בשחרור היה עגול, והקליפה החיצונית שלו קשיחה. המרחקים של כ-17,570 ו-17,631 ק"מ שייכים לשלבים מאוחרים יותר, כשהגוף עמד על כדור הארץ במרחק; הם מרחקי המרכז של המצבים המצומדים האלה, ולא הרדיוס של פני השטח שעליהם נוחתים המכתשים של הדוגמה.

תוכן העניינים

- הסביבה החישובית; תקציר; מבוא — הספרות והמודל; מה המאמר מציע
- **PART A** — מונחים והגדרות
 - A.1 — המונחים של המודל
 - A.2 — שלושת הגבהים
- **PART B** — מה שהסדרה קבעה
 - B.1 — שלושת השלבים של מאמר 3
- **PART C** — המכתשים: מהו מכתש, כמה מכתשים יש, והמכתש כרשומה של החומר החוזר
 - C.1 — הימות: מהיכן בא החומר החוזר
 - C.2 — מה המכתש לוקח מהים
 - C.3 — כמה מכתשים
 - C.4 — רשומת המכתשים היא הרשומה של הימות
 - C.5 — מבחן המקור
 - C.6 — גודל המכתש ומסת הגוף החוזר
- **PART D** — המכתשים, הגלויים והקבורים
 - D.1 — מכתשים שנקברו יחד עם המקורות של הצד הרחוק
 - D.2 — מכתשים שהותכו לתוך רצפות הימות
 - D.3 — המסה שמתחת למכתשים המומסים של הימות
- **PART E** — גודל ומצב: הימות והמכתשים בזמן
 - E.1 — שלושה מצבים על רצפה אחת
 - E.2 — מצב המכתשים לפי גודל
 - E.3 — הימות: טמפרטורה, צמיגות וזמן
 - E.4 — החומר המגיע: טמפרטורה, גודל ומרחק
 - E.5 — השרשרת בזמן
 - E.6 — השפה: נשחקה בחום או הוצפה
 - E.7 — מה זה מראה
- **PART F** — השפה
 - F.1 — השפה בארבעה קווי אורך
- **PART G** — תחתית המכתש מתחת לקרקע
 - G.1 — הרצפה מתחת לקרקע
 - G.2 — הרצפות של המכתשים הגדולים על הבזלת
 - G.3 — ברזל ברצפות הגבוהות ובנמוכות
- **PART H** — רצפת המכתש
 - H.1 — שטיחות וחספוס
- **PART I** — הפסגה המרכזית

- I.1 — הפסגה בארבעה קווי אורך
- **PART J** — המנוע
 - J.1 — האנרגיה הזמינה בפתח
 - J.2 — מהירות ולחץ הלב
 - J.3 — אטמוספירת האדים היא חלק מהמבחן
 - J.4 — גוש נוחת, ענן של חומר ופני שטח משמרים
 - J.5 — קשירה כבידתית ותקרת מהירות
- **PART K** — הגאומטריה
 - K.1 — חזרה אל הקליפה באותו גובה
 - K.2 — נחיתה על מטרה גבוהה יותר
 - K.3 — מגמת ההלם תלויה במסלול
 - K.4 — היכן נוחתים החומרים שהגוף עצמו השליך
- **PART L** — הכימיה
 - L.1 — חומר ימי בטבעות סביב הים
 - L.2 — המכתש והקרקע שסביבו
 - L.3 — התוריום והחומר החוזר
 - L.4 — פנים המכתש
 - L.5 — המסה הזרה שאינה שם
 - L.6 — החומר הארצי לאחר השחרור
 - L.7 — הצד הקרוב שומר יותר מהמכתשים הקטנים האחרונים
 - L.8 — תיעוד שנשמר שלם: הירח מעולם לא עבר דרך טבעת
- **PART M** — תיארוך
 - M.1 — חומר מושלך שנלכד לאחר השחרור
- **PART N** — סטטיסטיקה
 - N.1 — כיצד הושוו המכתשים
 - N.2 — מה נמדד ומה מונח
- **PART O** — תחזיות ומבחנים
 - O.1 — ארבעה-עשר מבחנים ממוקדים
 - O.2 — המחקרים בטבלה אחת
- **PART P** — דיון
 - P.1 — מה רושמים שני החצאים
 - P.2 — מה נשאר מחוץ למאמר
 - P.3 — החידוש והתרומה לסדרה
- **PART Q** — מסקנות
 - Q.1 — מה המאמר הראה
- נספח — שחזור ומפת החידושים; עבודה להמשך; זמינות הקוד; מקורות

השאלה. במודל LEF חומר עמוק הושלך דרך פתחים במעטפה של כדור הארץ, וחלק ממנו חזר אל הקליפה החיצונית, שהתרוממה מאוחר יותר עם הירח המתהווה כפני השטח של הכיפה שלו. המאמר הזה בוחן שאלה הנפרדת מהעברת המסה: האם חומר חוזר כזה יכול להגיע במהירות המספיקה ליצירת מכתשים ולהלם במטרה?

המעוף. בקירוב של כבידה מרכזית ללא גרר נגזרות מהירות החזרה, דרישת האנרגיה והמהירות ביחס לפני שטח מסתובבים. חומר שמושלך רדיאלית וחוזר לאותו רדיוס נוחת במהירות יחסית השווה למהירות ההשלכה. בדוגמה של 5 ק"מ/ש' מתקבלים מעוף של כ-28 דקות ונחיתה כ-1,032 ק"מ מערבית לאתר ההשלכה; לנחיתה חזיתית אידיאלית של בזלת מתקבל לחץ מגע מוערך של 45.6 ג'יגה-פסקל. לכן החזרה הכבידתית אינה מחייבת נחיתה איטית, אבל מהירות ההשלכה עצמה עדיין דורשת מקור אנרגיה. הגזירה מראה גם שהתלות של מהירות הנחיתה בגובה המטרה אינה מעידה על מגמה אוניברסלית בזמן.

התנאים. המאמר מקשר בין המבחנים של ההשלכה, המעוף, המפגש וההלם, עם אילוצים על הגרר, על ההתפרקות, על מסת הגוף החוזר ועל שימור הרשומה: גוף בגודל קילומטר שחוצה אטמוספירת אדים של 100 בר שומר על כמחצית ממהירותו, וחומר שהושלך מהר יותר ממהירות המילוט אינו חוזר. כמעט כל המכתשים של הירח, כ-99%, הם של חומר ארצי חוזר. אילו נקראו כגופים פוגעים חיצוניים, המכתשים הנראים היום היו משאירים 2%–6% של חומר זר ב-5 הק"מ העליונים של הקרום; היסודות הסידרופיליים של הקרום מסתכמים ב-0.9%–2%, ובמקומות שבהם נמדדו איזוטופי הרתניום שלהם, הם של כדור הארץ.

המקור. המקור של החומר החוזר הוא הימות, 34 הפתחים מעל כיפות ההזנה של מאמר 5 — רובם; Serenitatis-I Imbrium, ימות המגע, העבירו את הלחץ והחומר של כדור הארץ אל הירח ולא השליכו (Serenitatis רק כפפוצים קלים). הקרקע סביב כל אחד מהם נושאת את הברזל והטיטניום שלו, ההולכים ופוחתים עם המרחק: ברזל מ-6.9 אחוזי משקל בתוך 25 ק"מ מהשוליים ועד 3.1 ב-100–150 ק"מ, עם עודף עד 600 ק"מ. לא כל מכתש נראה: בצד הרחוק נקברו מכתשים יחד עם המקורות שיצרו אותם, וברצפות הימות שלושה מכל חמישה מכתשים של 10 ק"מ ומעלה הותכו לתוך הרצפה, ומבין אלה של 20 ק"מ ומעלה רק אחד חד, כמאתיים פעם פחות מאשר ברמות; בימות של המגע המכתשים הגדולים נעלמו לגמרי.

קווי האורך. קווי האורך מוסיפים רשומה של האופן שבו נפלו המכתשים (חלקים F-I). חומר שהגוף עצמו השליך נוחת לכיוון החצי המאסף שלו, 90° מזרח, הצפוף יותר (כ-250 לעומת 140–175 מכתשים של 20 ק"מ ומעלה למיליון קמ"ר, כשהימות ו-South Pole-Aitken מוסרים); החצי המוביל, 90° מערב, פוגש אותו חזיתית, והמכתשים שלו נושאים יותר פסגות מרכזיות, שפות משוננות ונמוכות יותר, והרצפות המחוספסות ביותר. כל חלק של מכתש שומר רשומה משלו: המרכז — את האנרגיה של הנחיתה; השפה — את הכוחות באותו רגע, הגבוהה ביותר בצד הרחוק והנמוכה ביותר בחצי המוביל; הרצפה — את הקרקע שמתחת, הנמוכה ביותר בצד הרחוק השכבתי והגבוהה ביותר בצד הקרוב. בתוך המכתש עובר אותו הרכב מהמרכז ועד השפה בכל קו אורך: המכתש מלא בחומר החוזר שיצר אותו. הייחוס של אוכלוסיית מכתשים ירחית למנגנון הזה נבדק לפי הקריטריונים של O.1§.

מה פירוש התקציר, במילים פשוטות. הספרות גורסת שהמכתשים של הירח נחפרו על ידי גופים מהחלל — אסטרואידים ושביטים — שפגעו במהירות של 15–20 ק"מ/ש'. המאמר הזה מציע מקור קרוב הרבה יותר. בזמן שהירח נבנה על כדור הארץ, חומר מהעומק הושלך מעלה דרך פתחים בקליפה, עף כמה מאות או כמה אלפי קילומטרים למעלה, ונפל חזרה על אותה קליפה. השאלה היא אם חומר שנפל חזרה כך יכול לנחות בעוצמה

מספקת כדי לחפור מכתש ולהשאיר בקרקע את סימני ההלם. המאמר עונה עליה בשני חצאים: תחילה בעקיבה אחר המעוף עצמו, ואחר כך בקריאת המכתשים של הירח של היום כרשומה שנחיתות כאלה היו משאירות.

מדוע החומר חוזר מהר כפי שעזב. כדור שנזרק ישר למעלה, בלי אוויר שיאט אותו, חוזר אל היד במהירות שבה נזרק: בדרך למעלה הוא ממיר מהירות בגובה, ובדרך למטה הוא ממיר את הגובה בחזרה באותה מהירות. חומר שמושלך מגוף האם עושה אותו דבר — 5 ק"מ/ש' החוצה, 5 ק"מ/ש' בחזרה. הסיבוב מוסיף דבר אחד. נקודה על פני שטח מסתובבים כבר נעה הצידה, וחומר שמושלך ממנה ישר למעלה נושא איתו את התנועה הצידית הזו; כשהחומר יורד חזרה לאותו מרחק מהמרכז, יש לו שוב בדיוק אותה תנועה צידית, משום שתנועת הסיבוב של גוף העף בחופשיות סביב המרכז נשמרת (זהו שימור התנע הזוויתי), כפי שמחליקה שומרת על הסיבוב שלה כשזרועותיה חוזרות למקום שבו התחילו. הקרקע שעליה הוא נוחת נעה הצידה באותו קצב, ולכן בכיוון הצידה השניים נמצאים במנוחה זה ביחס לזה, וכל 5 הק"מ/ש' הם מכה ישרה כלפי מטה. אבל למעלה, אותה תנועת סיבוב פרושה על מעגל גדול יותר, ולכן החומר מסתובב לאט יותר מהקרקע שמתחתיו, כפי שהמחליקה מסתובבת לאט יותר כשזרועותיה פרושות; הקרקע מקדימה, והחומר יורד מאחורי נקודת המוצא שלו, מערבה. ב-5 ק"מ/ש' המעוף מגיע לגובה 1,932 ק"מ, נמשך 28 דקות ונוחת 1,032 ק"מ מערבה (K.18).

מדוע 5 ק"מ/ש' לתוך בזלת נותנים 46 ג'יגה-פסקל. כששתי חתיכות מאותו חומר נפגשות חזיתית, כל אחת מאטה את האחרת במידה שווה, ולכן החומר שמיד מאחורי חזית ההלם נע בחצי ממהירות הנחיתה: 2.5 ק"מ/ש' בנחיתה של 5 ק"מ/ש'. החזית עצמה רצה דרך הבזלת מהר יותר; כפי שנמדד על בזלת, מהירותה היא 3.5 ק"מ/ש' ועוד 1.3 כפול מהירות החומר שמאחוריה, כאן 6.75 ק"מ/ש'. הלחץ מאחורי החזית הוא הצפיפות כפול שתי המהירויות: $2,700 \text{ ק"ג/מ}^3 \times 6,750 \text{ מ'}/\text{ש'} \times 2,500 \text{ מ'}/\text{ש'}$, כלומר 45.6 ג'יגה-פסקל (J.28). זה הרבה מעל הלחצים שבהם המינרלים של הבזלת מתחילים לרשום הלם ולשנות את המבנה שלהם [S4]; ב-2 ק"מ/ש' אותו חישוב עדיין נותן כ-13 ג'יגה-פסקל. לכן נחיתה של כמה ק"מ/ש' אינה נפילה רכה: היא אירוע הלם, מאותו סוג שהספרות קוראת במכתשי הירח, אף שהיא מתחת למהירויות של גוף מהחלל.

מה זה עולה. כדי להיות מושלך ב-5 ק"מ/ש', כל קילוגרם חייב לקבל בפתח 12.5 מגה-ג'אול של אנרגיה. את האנרגיה הזו מספק הלחץ מכדור הארץ: הסיבוב והמיון, מנגנון אחד, יוצרים את הלחץ בכדור הארץ, והוא עובר דרך האגס אל הפתחים ומתיז מהם את החומר. החומרים הנדיפים שהחומר נושא, המתפשטים כשהוא עולה, מסייעים. בדרך חזרה החומר עשוי לחצות אטמוספירה צפופה של אדים; גוף ברוחב קילומטר, שחוצה עמוד אדים עם 100 בר בבסיסו, שומר על כמחצית ממהירותו (J.38). חומר שמושלך מהר יותר ממהירות המילוט — המהירות שבה המשיכה של גוף האם כבר אינה יכולה להחזיר אותו — עוזב ואינו חוזר. אלה התנאים שהמנגנון חייב לעמוד בהם; חלק O מנסח כל אחד מהם כמבחן.

מה פירוש "כמעט כל המכתשים הם של חומר ארצי חוזר". הכוונה היא שהחומר שחפר את המכתשים היה של כדור הארץ עצמו: חומר עמוק שעזב דרך הפתחים וחזר, ולא גופים שהגיעו מחוץ למערכת כדור הארץ-ירח. כ-99% מהמכתשים הם מהסוג הזה; חומר זר, אם יימצא בכלל, יהיה בכמויות קטנות מאוד, מלבד האבק הדק שהחלל מביא לכל משטח חסר אוויר. לכך יש מבחן שאינו תלוי במעוף. גוף מהחלל מביא איתו את המסה שלו, וחלק ממנה נשאר בקרקע; גופים כאלה עשירים ביסודות הסידרופיליים ("אוהבי הברזל") — אירידיום, אוסמיום, פלטינה, רותניום — שהקרום של הירח עצמו כמעט חסר אותם, כך שתוספת קטנה בולטת מיד. אילו המכתשים הנראים היו נחפרים מבחוץ, הם היו משאירים 2%–6% של חומר זר ב-5 הק"מ העליונים של הקרום. כלל היסודות הסידרופיליים של הקרום, כשהם נספרים כאילו כולם נמצאים בשכבה הזו, מגיע ל-0.9%–2%; ובמקומות שבהם נמדדו בהתכי מכתשים ירחיים האיזוטופים של רותניום, המבדילים בין מקור אחד במערכת השמש לאחר, הם של כדור הארץ (L.58).

מהיכן בא החומר. הפתחים שהשליכו אותו הם הימות: במאמר 5 י'ם הוא פתח מעל *כיפת הזנה*, הגוף שנדחף מלמטה ודרכו עלה החומר; המישור הכהה שלו הוא רק השכבה האחרונה שקפאה בו. רוב הימות השליכו חומר;

Imbrium ו-Serenitatis, ימות המגע, העבירו את הלחץ והחומר של כדור הארץ אל הירח ולא השליכו (Serenitatis רק פצפוצים קלים). אם הימות השליכו את החומר, הקרקע סביב כל אחד מהם חייבת לשאת את הברזל והטיטניום של הים, הכי הרבה ליד השוליים ופחות הרחק יותר — והיא אכן נושאת אותם. לא כל מכתש שרד כדי להיספר. בצד הרחוק, השכבות שבנו מאוחר יותר את הקרום העבה שלו כיסו יחד את הפתחים הישנים ואת המכתשים שסביבם. ברצפות הימות, שעדיין היו חמות ורכות כשהרבה חומר נחת, שלושה מכל חמישה מכתשים של 10 ק"מ ומעלה הותכו לתוך הרצפה ואיבדו את עומקם. הימות של המגע — הכתם בצד הקרוב שנגע בכדור הארץ בזמן החיבור, ושקפא מאוחר, Serenitatis ראשונה, קרוב מאוד לכדור הארץ, ו-Imbrium אחרי הניתוק — אינם שומרים שום מכתש גדול.

מה מוסיפים קווי האורך. הירח מפנה פנים אחד אל כדור הארץ, ולכן חצי אחד שלו פונה תמיד קדימה לאורך המסלול (החצי המוביל, שמרכזו ב-90° מערב) והאחר אחורה (החצי המאסף, שמרכזו ב-90° מזרח). משהתרומם, הגוף השליך חומר גם מהפתחים שלו עצמו, לאט — לכל היותר בערך במהירות המילוט שלו — והסיבוב שלו קבע היכן החומר הזה נפל חזרה. בחצי המאסף הקרקע התרחקה מהחומר הנופל, שהשיג אותה מאחור ונחת ברכות; בחצי המוביל הקרקע המשיכה לנוע אל תוך החומר הנופל ופגשה אותו חזיתית. לכן החצי המאסף אסף יותר מכתשים, והחצי המוביל את הנחיתות הקשות יותר, שניכרות בצורת המכתשים שלו: יותר פסגות מרכזיות, רצפות מחוספסות יותר, שפות משוננות ונמוכות יותר. כל חלק של מכתש שומר רשומה אחרת: הפסגה המרכזית, הריבאונד של הנחיתה, רושמת עד כמה היא הייתה קשה; השפה רושמת את הכוחות של אותו רגע; הרצפה רושמת את הקרקע שמתחת. והרכב המכתש משתנה באותו אופן מהמרכז ועד השפה בכל קו אורך, משום שהמכתש מלא בחומר שיצר אותו.

מבוא — הספרות והמודל

מאמר 3 עוסק בהזנת הגוף מבפנים ובהתרוממות הקליפה החיצונית כפני השטח של הכיפה, ומציע שהמכתשים שנוצרו על הקליפה נדדו איתה. כאן מטופל התהליך שמתרחש בזמן ההזנה וההתרוממות: מה קורה לחומר שעזב את פתח ההשלכה, חזר ונחת על פני השטח. הפיזיקה של הכיפה ושל החיבור אינה נגזרת כאן מחדש.

מכתש וסימני הלם רושמים נחיתה, אבל מקור הגוף החוזר דורש ראיות נוספות. מכתשים משניים — מכתשים שנחפרו על ידי חומר שהושלך ממכתש גדול יותר ונפל חזרה — כבר ידועים [S1], והמחקר של העברת חומר מכדור הארץ לירח קדם למודל הזה [S2]. לכן חומר חוזר שיוצר מכתשים אינו חדש כשלעצמו. החידוש שנבחן כאן הוא מקור השלכה פנימי בשלב הבנייה, ונחיתה על הקליפה לפני שהפכה לחלק מפני השטח של הירח. כותרת המאמר אינה טענה שכל המכתשים נוצרו בלי אסטרואידים.

הטבלה מציבה את הקריאה של הספרות ואת זו של המודל זו לצד זו, שאלה אחר שאלה. כל שורה היא מקום שבו אותם מכתשים מקבלים מוצא שונה, וכל אחת נדונה בחלק שמודד אותה: המהירויות בחלקים J ו-K, המקור בחלקים C ו-D, שני החצאים בחלקים I-F, המסה הזרה ב-L5, הגילים בחלק M.

שאלה	הספרות	המודל
מה יצר את המכתשים	גופים פוגעים חיצוניים, אסטרואידים ושביטים, ב-15–20 ק"מ/ש'	חומר ארצי חוזר, שהושלך מהפתחים ונחת ב-2–8 ק"מ/ש'
היכן	על הירח, לאורך ההיסטוריה שלו	על הקליפה כשהייתה מונחת על כדור הארץ, ועל הגוף; הקליפה התרוממה איתם
המקור	מחוץ למערכת כדור הארץ-ירח	הימות וכיפות ההזנה, הגלויים והקבורים
החצי המוביל והחצי המאסף	יותר מכתשים בחצי המוביל	יותר בחצי המאסף, הנחיתות הקשות יותר בחצי המוביל
המסה הזרה	נשמרה בחלקה, והשאר אבד	אין מה למצוא: החומר ארצי
הגילים	צפיפות המכתשים מומרת לשנים לפי שטף קבוע	אינה מומרת: השטף לא היה קבוע

שתי הקריאות של המכתשים, שאלה אחר שאלה.

השורה האחרונה דורשת מילה. הספרות הופכת את מספר המכתשים ליחידת שטח לגיל, בהנחה שגופים מהחלל הגיעו בקצב ידוע וקבוע. אם המכתשים הושלכו על ידי הימות בזמן שהירח נבנה, הם הגיעו בקצב שבו הפתחים השליכו אותם, והקצב הזה לא היה קבוע; ספירת מכתשים מודדת אז כמה פני שטח קיבלו, ולא כמה זמן הם עמדו פתוחים.

איך בנוי המאמר. המאמר קובע תחילה את המילים שלו (חלק A) — *חומר חוזר, נחיתה, מכתש, ושלושת הגבהים השונים המסתתרים במילה "עומק"* — ומזכיר את שלבי הבנייה שבהם נוצרו המכתשים (חלק B). לאחר מכן הוא פונה אל המכתשים של הירח של היום: כמה יש ואיפה, והימות כמקור שלהם (חלק C); המכתשים שאינם נראים, שכוסו בצד הרחוק או הותכו לתוך רצפות הימות (חלק D); והסדר בזמן של הימות ושל המכתשים, כפי שהוא נקרא מהמצב שבו נמצא כל מכתש (חלק E). חלקים F, G, H ו-I קוראים את ארבעת החלקים של מכתש — השפה, התחתית שמתחת לקרקע, הרצפה והפסגה המרכזית — בארבעה קווי אורך, כרשומה של העוצמה שבה נחת החומר. חלק J נותן את המנוע: האנרגיה הדרושה בפתח, הלחץ של הנחיתה, אטמוספירת

האדים, והמהירות שמעליה החומר אינו חוזר. חלק K נותן את הגאומטריה של המעוף: החזרה לאותו רדיוס, הנחיתה על מטרה גבוהה יותר, והיכן נפלו החומרים שהגוף עצמו השליך. חלק L קורא את הכימיה, מטבעות החומר הימי סביב כל ים ועד המסה הזרה שאינה שם. חלק M עוסק בחומר הארצי שהירח לכד לאחר השחרור; חלק N אומר כיצד הושוו המכתשים ומה נמדד לעומת מה שמונח; חלק O מרכז את המבנים ואת המחקרים; חלקים P ו-Q דנים ומסכמים.

המכתשים העתיקים ביותר על הירח נוצרו בו כשהיה על כדור הארץ. בזמן שהקליפה של מאמר 3 עדיין הייתה מונחת על גוף האם, חומר עמוק שהושלך דרך הפתחים שלה עלה, הסתובב וירד חזרה עליה. הכבידה אינה מאטה גוף חוזר: חומר שמושלך רדיאלית מפני שטח מסתובבים חוזר לאותו רדיוס במהירות שבה עזב — 5 ק"מ/ש' החוצה, 5 ק"מ/ש' בחזרה, 28 דקות באוויר, אלף קילומטר מערבה. חמישה קילומטרים לשנייה לתוך בזלת הם 46 ג'יגה-פסקל במגע, מעל כל סף של מטמורפיזם הלם. המכתשים שנוצרו כך התרוממו עם הקליפה אל הירח ושמרו על גודלם (מאמר 3, B.6§; מאמר 7, D.5§). כמעט כל המכתשים של הירח — כ-99% — הם של חומר ארצי חוזר; חומר זר, אם יימצא בכלל, יהיה בכמויות קטנות מאוד, מלבד אבק החלל.

מה שהמנגנון חייב לספק מנוסח כשלושה מספרים. אנרגיית ההשלכה — $u^2/2$, 12.5 מגה-ג'אול לק"ג ב-5 ק"מ/ש' — מסופקת בפתחים על ידי הלחץ מכדור הארץ, שיוצרים הסיבוב והמיון ושעובר דרך האגס; החומרים הנדיפים שבחומר מסייעים. גוף חוזר מרוכז חייב לחצות את אטמוספירת האדים: גוף בגודל קילומטר שעובר דרך 100 בר שומר על מחצית ממהירותו. והקליפה חייבת להיות חזקה מספיק כדי להחזיק מכתש ברוחב קילומטרים עד שהיא מתרוממת. כל אחד מאלה מופיע ב-O.1§ יחד עם המבחן שלו; מגמת הלם עם הגובה ותקרת הלם הן תכונות של מסלול אחד, לא של המנגנון, ואינן נטענות.

הימות הם המקור. הפתחים שהשליכו את החומר החוזר הם הימות, רובם; Serenitatis ו-Imbrium, ימות המגע, לא השליכו, רק פצפוצים קלים (C.1§; מאמר 5). הקרקע סביב כל ים נושאת את הברזל שלו, ההולך ודועך עם המרחק. לא כל מכתש נראה: בצד הרחוק המכתשים כוסו על ידי השכבות שלו יחד עם המקורות שיצרו אותם (D.1§), ובצד הקרוב רצפות הימות התיכו כשלושה מכל חמישה (62%) מהמכתשים שנספרו עליהן (D.2§).

קווי האורך רושמים את העוצמה שבה נפלו המכתשים. הגוף השליך חומר מהפתחים שלו עצמו, לא רחוק ולא מהר — לכל היותר כ-2 ק"מ/ש', מהירות המילוט שלו עצמו. מה שהשליך מהצד הרחוק נפל מעט מאחור, לכיוון 90° מזרח; מה שהשליך מ-90° מזרח נפל חזרה על 90° מזרח; מה שהשליך מ-90° מערב נפל חזרה ונפגש חזיתית. לכן החצי המאסף, 90° מזרח, הוא הצפוף יותר, והחצי המוביל, 90° מערב, הוא זה שנחתו עליו בעוצמה הרבה ביותר: המכתשים שלו נושאים יותר פסגות מרכזיות ושפות משוננות יותר (חלקים F-I).

איך לקרוא את התיבה. הפסקה הראשונה היא ההצעה והפיזיקה שלה, שורה אחת לכל אחת. המכתשים נוצרו על הקליפה כשהיא עדיין הייתה חלק מפני השטח של גוף האם; לאחר מכן הקליפה התרוממה, כפני השטח של הכיפה, ונעשתה החלק החיצוני של הירח, ונשאה איתה את המכתשים שלה בלי לשנות את גודלם. הכבידה לוקחת בחזרה בדרך למטה בדיוק את המהירות שלקחה בדרך למעלה, ולכן השלכה של 5 ק"מ/ש' היא נחיתה של 5 ק"מ/ש'; נחיתה במהירות כזו על בזלת יוצרת לחץ של 46 ג'יגה-פסקל בנקודת המגע, מספיק כדי להשאיר את סימני ההלם שהספרות קוראת כחתימה של מכתש שיצר גוף מהחלל. "מלבד אבק החלל" פירושו שהאבק הדק שכל משטח חסר אוויר אוסף אינו נספר בין המכתשים.

הפסקה השנייה הופכת את הנקודות הפתוחות לדרישות. האנרגיה הדרושה כדי להשליך קילוגרם במהירות u היא $12.5 \frac{u^2}{2}$: מגה-ג'אול ב-5 ק"מ/ש', שהלחץ מכדור הארץ מספק בפתח, והגז המתפשט של החומר מסייע. גוף שנופל חזרה דרך אדים צפופים מואט על ידם, וגוף בגודל קילומטר שעובר דרך עמוד של 100 בר שומר על כמחצית ממהירותו — עדיין כמה ק"מ/ש'. והקליפה חייבת להיות יציבה מספיק כך שמכתש שנוצר בה לא יוחלק לפני שהיא מתרוממת. מטרה גבוהה יותר או מסלול אחר משנים את המהירות של נחיתה יחידה, אבל אין בכך כדי לגרום להלם לעלות או לרדת באופן קבוע עם הזמן, ומגמה כזו אינה נטענת (K.3§).

הפסקה השלישית מציינת את המקור ואומרת מדוע הרשומה חלקית. הימות, רובם, הם הפתחים; הקרקע שסביבם נושאת את מה שהשליכו. שני תהליכים הסתירו מכתשים: בצד הרחוק, השכבות שעיבו מאוחר יותר את הקרום שלו כיסו את הפתחים הישנים יחד עם המכתשים שסביבם; בצד הקרוב, רצפת ים שעדיין הייתה רכה מחום קיבלה את המכתשים שנחתו עליה והתיכה אותם לתוכה, כך שמבין המכתשים שנספרו על הרצפות כשלושה מכל חמישה איבדו את צורתם.

הפסקה הרביעית מתארת את השלב השני של יצירת המכתשים, לאחר שהגוף התרומם והסתובב עם כדור הארץ. הוא השליך חומר מהפתחים שלו עצמו, לאט. במקום שבו הקרקע התרחקה מהחומר הנופל, הנחיתה הייתה עדינה והמכתשים רבים; במקום שבו הקרקע נעה אל תוכו, הנחיתה הייתה קשה, והמכתשים שם נושאים את סימני הנחיתה הקשה.

חלק A — מונחים והגדרות

הבעיה

אותן מילים — מכתש, פגיעה ועומק — נושאות את הקריאה של הספרות. הגישה: המונחים של המודל נקבעים במקום אחד, והמילה עומק מתפצלת לשלושת הגבהים שנמדדים בפועל.

חלק זה קובע את המילים לפני שהמאמר משתמש בהן. הסיבה מעשית. בספרות המילה מכתש כבר נושאת סיפור — גוף שבא מבחוץ פגע בירח וחפר בו בור — והמילה עומק משמשת בבת אחת לכמה מדידות שונות. קורא שמביא את המשמעויות האלה אל המאמר הזה יקרא מאמר אחר. לכן חלק A עושה שלושה דברים: הוא נותן שמות לחלקי המכתש ולמכשירים ולקטלוגים שדרכם נקראים המכתשים; §A.1 קובע את המונחים של המודל; §A.2 מפצל את המילה עומק לשלושת הגבהים שנמדדים בפועל, משום שהחצי המוביל והחצי המאסף של הירח נבדלים באחד מהם ולא באחר.

חלקי המכתש ומילות המדידה. כל מונח 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
חלקי המכתש		
מכתש פשוט	מכתש קטן בצורת קערה פשוטה: דפנות חלקות המתעקלות מטה אל תחתית מעוגלת	המכתשים של קילומטרים ספורים; מכתשים של פחות מ-5 ק"מ אינם מושווים כאן (§B.1)
מכתש מורכב	מכתש גדול יותר שדפנותיו גלשו פנימה במדרגות (טרסות), והשאירו רצפה שטוחה ולעיתים קרובות פסגה במרכז	רוב המכתשים של 20 ק"מ ומעלה המשווים בחלקים F–I
שפה	הטבעת המוגבהת סביב המכתש; הקו הגבוה ביותר שלה הוא רכס השפה	גובהה, מידת השוניות שלה ומידת השתמרותה (§A.2, חלק F)
רצפה	תחתית המכתש, בתוך הדפנות	גובהה מתחת לקרקע שסביב ומידת החספוס שלה (חלקים G–H)
פסגה מרכזית	גבעה העומדת במרכז הרצפה של מכתש מורכב	תיעוד של אנרגיית הנחיתה (חלק I)
חומר נפלט (ejecta)	החומר שמכתש בשעת היווצרותו משליך החוצה ומניח סביבו, והולך ומידלדל כלפי חוץ	מוחזק בנפרד מהחומר החוזר שיצר את המכתש
מכתשים משניים	מכתשים קטנים שיוצרים גושי החומר הנפלט ממכתש גדול יותר כשהם נופלים שוב	יחד עם הרסם הם שולטים במכתשים של 5 ק"מ ומטה, שאינם משווים (§B.1)
רסס	חומר דק ומהיר שנזרק מפתח פעיל, נוחת קרוב אליו ויוצר מכתשים קטנים	טבעת המכתשים הקטנים על שפת ים (§C.2)

מטמורפיזם הלם	שינויים במינרלים שרק לחץ פתאומי של ג'יגה-פסקלים רבים יכול ליצור — מינרלים מעוותים ומינרלים של לחץ גבוה, זכוכית מותכת; ג'יגה-פסקל אחד הוא בערך פי עשרת אלפים מלחץ האוויר בגובה פני הים	הנחיתות של המודל חייבות להגיע אליו: 5 ק"מ/ש' אל תוך בזלת נותנים 46 ג'יגה-פסקל (J.2§)
ספירת מכתשים		
קטלוג Robbins	קטלוג גלובלי של מכתשי הירח עד קוטר של 1–2 ק"מ, לכל מכתש מיקומו וקוטרו [S6]	המכתשים של 20 ק"מ ומעלה הנספרים ב-C.3§
צפיפות מכתשים	מספר המכתשים לכל מיליון קמ"ר של שטח שנספר; מיליון קמ"ר הוא ריבוע שצלעו 1,000 ק"מ	מאפשרת להשוות אזורים בעלי שטח שונה (C.3§)
תחום גודל	טווח של קטרים שבתוכם משווים מכתשים, למשל 20–30 ק"מ	רק מכתשים מאותו תחום מושווים, כדי שהגודל לא ייחשב בטעות להבדל
כיפת ספירה (cap)	אזור עגול של פני השטח, ברדיוס זוויתי נתון סביב מרכז	ארבע כיפות ספירה ברדיוס 30° על קו המשווה (C.3§)
SPA, אגנים גדולים	South Pole–Aitken, האגן הגדול ביותר של הירח, בצד הרחוק; ו-20 האגנים הגדולים, ברוחב מאות קילומטרים	מוסרים מהספירות, משום שכל אחד מהם מחק את המכתשים שבתוכם
כימיה		
FeO, אחוז משקלי	תחמוצת ברזל, באחוזים ממשקל חומר פני השטח; נקראת מצבע אור השמש המוחזר על ידי מצלמת הרב-ערוצים של Kaguya (Multiband Imager) [S10]	הסימן של חומר הים על הקרקע שסביבו (C.5§)
תוריום, ppm	יסוד רדיואקטיבי שמופה על ידי Lunar Prospector מקרני הגמא של התפרקותו, בתאים רחבים; ppm הוא חלקים למיליון	סימן שני, הנקרא כערך אזורי (C.5§)
מקומות על הירח		
החצי המוביל והחצי המאסף	הירח מפנה פנים אחד תמיד אל כדור הארץ; החצי הפונה לכיוון תנועתו לאורך המסלול הוא החצי המוביל, שמרכזו ב-90° מערב, והחצי שמאחוריו הוא החצי המאסף, שמרכזו ב-90° מזרח	המקום שבו החומר החוזר נחת בעוצמה והמקום שבו נחת ברכות (K.4§)

A.1 המונחים של המודל

הטבלה השנייה קובעת את המילים הנושאות את המודל. כל שורה נותנת שם לדבר שגם הספרות נותנת לו שם, אבל מעניקה לו את המשמעות שיש לו בעמודים הבאים. השורות החשובות ביותר הן שלוש הראשונות:

המכתשים של מאמר זה אינם נחפרים בידי גופים שבאו מבחוץ, אלא הם המקומות שבהם חומר שנזרק מהפתחים של הגוף בשעת היווצרותו חזר ונפל.

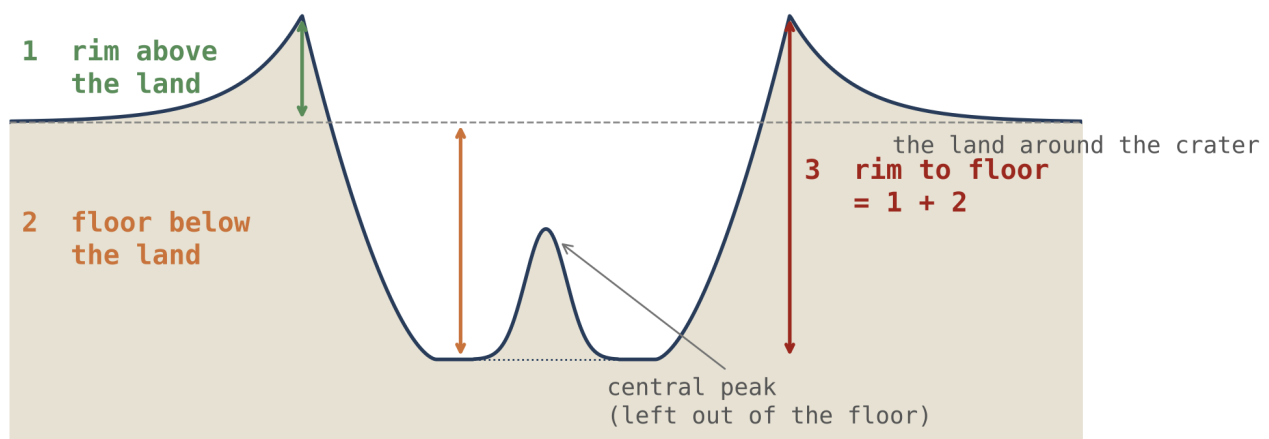
מונח	במאמר זה
חומר חוזר	חומר שנזרק מפתח וחזר אל פני השטח — של גוף האם או של הגוף
נחיתה	הגעתו של החומר החוזר אל פני השטח; המילה פגיעה שמורה לגופים הפוגעים החיצוניים של הספרות
מכתש	המקום שבו נחת החומר החוזר
פתח, ים	פתח מעל כיפת הזנה; הימות הם הפתחים (מאמר 5)
כיפת הזנה	הכיפה שהורמה ממוקד תת-קרקעי מתחת לפתח, ושדרכה עלה החומר
מוביל, מאסף	חצאי הירח שמרכזיהם ב-90° מערב וב-90° מזרח, לפי המוסכמה המקובלת
בלייה	שחיקתה של שפה עם הזמן; חלקן של השפות השמורות היטב נקרא כבלייה, לא כגיל

שתי מילים זקוקות למשפט נוסף. *גוף האם* הוא כדור הארץ, שעל פניו מונחת הקליפה של הירח העתידי בזמן שנבנה; *הגוף* הוא הירח בזמן שעדיין היה מחובר אליו (מאמר 3). *כיפת הזנה* אינה גוף של התך שנעצר ונח בקרום: היא הצורה שהזרימה כלפי מעלה עצמה בנתה בזמן שעברה, כמו שמי מעיין חזק מרימים תלולית מעל מוצאם בזמן שהם זורמים (מאמר 5). השורה האחרונה חשובה לקריאת הספירות: כשהשפות של חצי אחד שמורות פחות מאלה של חצי אחר, מאמר זה קורא את ההבדל כשחיקה, ולא כמשטח צעיר יותר או זקן יותר.

A.2 שלושת הגבהים

שלושת הגבהים. המילה *עומק* מסתירה שלושה גבהים שונים, והחצאים נבדלים באחד מהם ולא באחר, ולכן הם מוחזקים בנפרד (איור 1). כל אחד מהם נמדד ביחס למפלס משלו: (1) *השפה מעל הקרקע* — כמה גבוה עומד רכס השפה מעל הקרקע שסביב המכתש; (2) *הרצפה מתחת לקרקע* — כמה עמוק נמצאת הרצפה מתחת לאותה קרקע; (3) *מהשפה אל הרצפה* — כמה עמוק נמצאת הרצפה מתחת לשפה שלה עצמה, וזהו אותו גובה בין שנקרא מהרצפה כלפי מעלה ובין שנקרא מהשפה כלפי מטה. השלישי הוא סכום שני הראשונים. תמונה עוזרת: קערה ששקועה בשולחן, ושפתה בולטת מעל משטח השולחן. השפה מעל השולחן היא הגובה הראשון, תחתית הקערה מתחת לשולחן היא השני, ומהשפה אל התחתית — השלישי. לשני מכתשים יכול להיות אותו גובה שלישי, והם יכולים להיבדל לגמרי באופן שבו הוא מתחלק בין שני הראשונים — לאחד שפה גבוהה ורצפה רדודה, לאחר שפה נמוכה ורצפה עמוקה — והחלוקה הזאת היא מה שקווי האורך רושמים.

כל גובה מוגדר כך שאפשר למדוד אותו על מפת גבהים בלי שיקול דעת. רכס השפה הוא הנקודה הגבוהה ביותר בכל אחד מ-72 אזימוטים, בין 0.85 ל-1.15 מהרדיוס; הקרקע שסביב היא מישור המותאם לטבעת שבין 1.5 ל-2 רדיוסים; הרצפה היא החלק המרכזי של המכתש, עד 0.4 מהרדיוס, בלי הפסגה המרכזית (G.1§). אזימוט הוא כיוון מצפן ממרכז המכתש; 72 מהם הם אחד בכל 5°, כך שהשפה נמדדת לאורך כל ההיקף. הקרקע נקראת הרחק מחוץ לשפה, ב-1.5 עד 2 רדיוסים, כדי שהשפה והחומר הנפלט הקרוב אליה לא יגביהו אותה. הפסגה המרכזית מושמטת מהרצפה, משום שפסגה העומדת על הרצפה הייתה גורמת לרצפה להיראות גבוהה ממה שהיא. שלושת הגבהים מחולקים בקוטר, כדי שאפשר יהיה להעמיד זה לצד זה מכתש של 20 ק"מ ומכתש של 80 ק"מ: מה שמושווה הוא הצורה, לא הגודל.



איור 1. שלושת הגבהים של מכתש (A.2§): (1) השפה מעל הקרקע שסביב המכתש, (2) הרצפה מתחת לאותה קרקע, (3) מהשפה אל הרצפה, שהוא סכום השניים. הפסגה המרכזית מושמטת מהרצפה. שרטוט סכמטי, לא בקנה מידה.

איור 1 מראה מכתש בחתך: הקו המקווקו הוא מפלס הקרקע שסביבו, החץ הירוק הקצר משמאל הוא השפה העומדת מעל מפלס זה, החץ הכתום הוא הרצפה הנמצאת מתחתיו, והחץ האדום הארוך מימין הוא כל הירידה מרכס השפה אל הרצפה. הפסגה המרכזית עולה מן הרצפה, והיא מושמטת כשקוראים את הרצפה.

מכתשים הושוו רק בתוך אותו תחום גודל — 20–30, 30–50 ו-50–100 ק"מ. אי-הסדירות של השפה והחספוס של הרצפה הושוו בתוך המחצית העמוקה יותר של כל תחום, כדי ששפה שהתרככה או רצפה שהתמלאה לא ייחשבו בטעות לעוצמת נחיתה; שלושת הגבהים הושוו על פני כל המכתשים. הסיבה למחצית העמוקה היא זו: מכתש שנשחק או התמלא בחלקו נראה חלק יותר משנוצר, ואילו מכתשים כאלה היו מעורבים בהשוואה, חצי של הירח שיש בו יותר מכתשים שחוקים היה נראה כאילו נחתו עליו ברכות רבה יותר. הגבלת ההשוואה למכתשים העמוקים והשמורים יותר מסירה את הבלבול הזה.

השפות אינן שמורות במידה שווה. לפי מידת השתמרות השפה, 43% מהמכתשים שב-90° מערב נופלים במחצית השמורה יותר, 50% ב-90° מזרח, 57% ב-180° ו-46% ב-0°. אילו השפות היו שמורות במידה שווה בכל מקום, בכל קו אורך היו 50%; החצי המוביל, 90° מערב, נמצא מתחת לזה, והצד הרחוק, 180°, מעליו. זוהי בלייה, לא גיל. החצי המאסף מוגן מכיוון תנועת הירח, ולאורך השנים שפותיו נשמרו; החצי המוביל פונה לאותו כיוון, ושפותיו נשחקו. זו הסיבה שמדדי השפה והרצפה שלמעלה נקראים במחצית העמוקה יותר של כל תחום.

מה שיש בידינו עכשיו: המונחים של המודל, אוצר מילים לחלקי המכתש, ושלושה גבהים, כל אחד עם מפלס הייחוס שלו, הנקראים בנפרד בחלקים F-I.

חלק B — מה שהסדרה כבר קבעה

הבעיה

המכתשים נקראים דרך הבנייה של מאמר 3. הגישה: השלבים שבהם נוצרו המכתשים מוצגים פעם אחת, ואינם נגזרים מחדש.

מאמר זה נבנה על המאמרים שקדמו לו ואינו חוזר על טיעוניהם. ממאמר 3, מנגנון LEF בפועל, הוא לוקח את הדרך שבה הגוף נבנה על כדור הארץ ואת סדר השלבים שלו; ממאמר 5, הימות, הוא לוקח את הפתחים שזרקו את החומר החוזר; ממאמר 7, הקטבים, הוא לוקח את מה שקרה למכתשים כשהגוף התעגל. חלק זה מציין מה נלקח והיכן נגזר כל פריט, כך שקורא המבקש לבדוק אחד מהם מופנה אל מקורו.

B.1 שלושת השלבים של מאמר 3

במודל, כדור הארץ, שהסתובב במהירות, הרים בליטה שנמשכה לצורת אגס, והגוף שהפך לירח נבנה על קצה האגס, והקליפה החיצונית שלו עמדה על כדור הארץ כפני השטח של כיפה (מאמר 3). הבנייה עברה שלושה שלבים, הקרויים על שם השינוי בצורת הגוף.

המכתשים נוצרו בשלושת השלבים של מאמר 3. בהתעגלות החוצה, כשהגוף שישב על קצה האגס נעשה כדור, המכתשים שכבר היו על הקליפה השתנו יחד עם פני השטח, באופן זהה בכל מקום, ומכתשים חדשים המשיכו להגיע. בפחיסות שבאה אחריה נוצרו רוב המכתשים, והגדולים שבהם: ההתמיינות כבר התקדמה, והחומר שנפלט היה קל ועשיר במים. התמיינות היא היפרדות של התך לחלקים כבדים יותר וקלים יותר, כמו שהשמנת עולה בחלב שעומד; עד הפחיסות היא התקדמה מספיק כדי שמה שהגיע אל הפתחים היה החלק הקל והעשיר במים. את הכוח לזרוק אותו נתן הלחץ מכדור הארץ, שיוצרים הסיבוב והמיון ושעובר דרך האגס אל הפתחים; החומרים הנדיפים שבו — מים וחומרים אחרים ההופכים בקלות לגז — סייעו, והחומר הקל נזרק רחוק ומהר. בהתעגלות פנימה, כשהפחיסות נרפתה והגוף נעשה צפוף יותר, המכתשים שמרו על גודלם, והקטבים אספו אותם (מאמר 7).

שלב	מה קרה למכתשים	היכן זה נגזר
התעגלות החוצה	המכתשים שעל הקליפה השתנו יחד עם פני השטח, באופן זהה בכל מקום; מכתשים חדשים המשיכו להגיע	מאמר 3
פחיסות	נוצרו רוב המכתשים, והגדולים שבהם, מחומר קל ועשיר במים	מאמר 3 (B.6–B.7§)
התעגלות פנימה	המכתשים שמרו על גודלם; הקטבים אספו אותם	מאמר 3; מאמר 7 (D.5§)

צבע השורות מסמן כמה מכתשים יצר כל שלב: הפחיסות, הכהה ביותר, יצרה את רובם. הנקודה החשובה לכל מה שבא אחר כך היא העמודה האחרונה של השורה השלישית. מכתש שנוצר על הקליפה בזמן שהייתה מונחת על כדור הארץ נישא על הקליפה ושמר על גודלו כשהגוף התעגל (מאמר 3, B.6§; מאמר 7, D.5§); אין לחשב אותו מחדש כאילו נוצר בכבידה הירחית של היום (C.6§). הפתחים שזרקו את החומר הם הימות של מאמר 5 (C.1§).

מכתשים של 5 ק"מ ומטה נשלטים בידי רסס ומכתשים משניים, ואינם מושווים במאמר זה. הם מושמטים משום שאי אפשר לייחס אותם לנחיתה אחת: מכתש קטן יכול להיות נחיתה ראשונית, גוש של חומר נפלט ממכתש שכן, או טיפת רסס מפתח סמוך, וספירה שלהם מערבבת את השלושה.

חלק C — המכתשים: מהו מכתש, כמה מכתשים יש, והמכתש כתיעוד של החומר החוזר

הבעיה

בספרות מכתש נקרא כסימן של גוף שבא מבחוץ. **הגישה:** מקור החומר החוזר מקבל שם, המכתשים נספרים, והמכתשים שסביב כל מקור נבדקים לחיפוש החומר שלו.

חלק זה עונה על שלוש שאלות בזו אחר זו. מאין בא החומר שיצר את המכתשים (C.1–C.2§§)? כמה מכתשים יש, והיכן הם צפופים ביותר (C.3§, מחקר 1)? והאם מכתש נושא את החומר של מקורו (C.4–C.5§§)? הסעיף האחרון, C.6§, שואל כמה גדול היה צריך להיות גוף חוזר כדי ליצור מכתש נתון על גוף האם, שבו הכבידה הייתה חזקה יותר והנחיתה איטית יותר מאשר של גוף שבא מבחוץ ופוגע בירח היום.

C.1 הימות: מאין בא החומר החוזר

הפתחים שמהם נזרק החומר החוזר (חלק J) הם הימות (מאמר 5). בשלב השטוח הם הפתחים של הקליפה על גוף האם, והחומר שהם זורקים נוחת עליו במהירויות של K.1§; מאוחר יותר הם הפתחים של הגוף עצמו, ומה שהם זורקים נופל בחזרה עליו במהירות הבריחה של הגוף או פחות ממנה (K.4§). שתי המהירויות שונות מאוד. על גוף האם, חומר שנזרק כלפי מעלה במהירות נתונה חוזר לאותו גובה באותה מהירות — 5 ק"מ/ש' בדרך החוצה, 5 ק"מ/ש' בחזרה (K.1§) — כמו אבן שנזרקת ישר למעלה וחוזרת אל היד במהירות שבה עזבה אותה. על הגוף, הקטן בהרבה, הפליטה הייתה חלשה יותר: מהירות הבריחה, המהירות שמעליה חומר שנזרק אינו חוזר, הייתה כ-2.0 ק"מ/ש' בצפיפות 1,300 ק"ג/מ"ק וכ-2.3 ק"מ/ש' בשחרור (K.4§), וכל מה שהיה איטי מזה נפל בחזרה.

מנגנון אחד מאחורי ההשלכה (תובנת המחבר). הסיבוב, ההתמיינות והלחץ הם מנגנון אחד: הסיבוב יוצר לחץ צנטריפוגלי ומניע את ההתמיינות; ההתמיינות מרכזת את החומר הכבד ודוחקת את השאר החוצה. זה מה שמשליך חומר החוצה מגוף צעיר, מהיר ועדיין לא ממוין — ורובו חוזר שוב ושוב. גוף שכבר מוין ומסתובב לאט אינו יכול עוד ליצור אגס או להשליך ירח.

רוב המכתשים שליד ים נוצרו בידי אותו ים; במקום ששני ימות נמצאים קרוב זה לזה, החומר החוזר של האחד נוחת באזור של האחר. חלק גדול ממה שים זורק נופל בחזרה אל פי הפתח שלו ונמס שוב; נחיתה מחוץ לים מוציאה את החומר מהמחזור, ובמקום שבו הוא נוחת הוא יוצר מכתש. התמונה היא של סיר שגולש: רוב הטיפות נופלות בחזרה אל הסיר, ורק אלה שנפלות על הכיריים נשארות במקום שבו נחתו. החומר שעוזב ים בכל רגע נושא את הריכוז של הים באותו רגע, ולכן צפוי שהכימיה של ים ושל המכתשים שלצדו תתאים. המשפט האחרון הזה הוא הבסיס למבחן המקור של C.5§.

כיצד הספרות קוראת מכתש. מכתש הוא בור שחפר גוף שבא מבחוץ — אסטרואיד או שביט — וים הוא אגן ענק מאותו סוג, שהתמלא מאות מיליוני שנים מאוחר יותר בבזלת שעלתה מן המעטפת. כ-170 מכתשים בעלי רצפה סדוקה, עם רצפות רדודות ומבוקעות הנושאות כתמי ים ולועות פירוקלסטיים [S9], נקראים כמכתשים רגילים שהורמו מלמטה בידי חדירה שהתפשטה כסיל (sill) מתחת לרצפה. לוע פירוקלסטי הוא מקום שבו התך עשיר בגז התפרץ כרסס של חרוזים זגוגיים; סיל הוא יריעה שטוחה של התך שפילסה את דרכה הצידה בין שכבות, והרימה את מה שהיה מעליה.

כיצד המודל קורא אותו. מכתש הוא המקום שבו נחת החומר החוזר. אין מכה מבחוץ ואין חדירה: מה שנמצא מתחת למכתש הוא השכבות שעליהן נחת, ומה שעומד במרכזו הוא אנרגיית הנחיתה. שתי הקריאות מסכימות על מה שנראה ונבדלות במה שיצר אותו. את ההבדל אפשר לבדוק, משום שהמודל קושר כל מכתש למקור סמוך שאת החומר שלו המכתש אמור לשאת; הקריאה של גוף שבא מבחוץ אינה קושרת אותו לשום מקום מסוים על הירח.

C.2 מה המכתש לוקח מהים

הרצפה של ים, כיפת ההזנה שלו והשפה שלו הם הנושא של מאמר 5 (חלקים D-F), ואינם חוזרים כאן. שני דברים נלקחים ממנו. רצפת ים קפאה אחרי שרוב החומר החוזר כבר נחת, ולכן היא התייעוד האחרון של המכתשים (D.2§). והשפה של ים נבנתה בידי רסס: הימות הנושאים מכתשים קטנים רבים על שפותיהם הם כנראה הימות העשירים בחומרים נדיפים, שהרסס הפעיל שלהם נחת על השפה ויצר בה מכתשים קטנים (O.1§). הנקודה הראשונה מסבירה מדוע רצפות הימות נושאות מעט מכתשים: הן היו עדיין נוזליות, או נמסו שוב, בזמן שרוב המכתשים נוצרו, ושמרו רק את מה שנחת אחרי שקפאו. השנייה נותנת מבחן, המפורט עם האחרים ב-O.1§: המכתשים הקטנים על שפת ים צריכים להיות רבים יותר במקום שבו הים היה עשיר יותר בחומרים נדיפים.

C.3 כמה מכתשים

השאלה שהסעיף הזה עונה עליה היא היכן על הירח המכתשים הגדולים צפופים ביותר, והאם המקום הזה הוא המקום שהמודל מנבא או המקום שהספרות מנבאת. שני הניבויים מצביעים לכיוונים הפוכים (מחקר 1, שלב 1), ולכן ספירה נקייה מכריעה ביניהם.

הניבוי הראשון הוא ספירה. קטלוג [S6] Robbins נספר בארבע כיפות ספירה ברדיוס 30° על קו המשווה, שמרכזיהן בארבעת קווי האורך: מכתשים של 20 ק"מ ומעלה לכל מיליון קמ"ר, כשהימות ו-South Pole–Aitken מוסרים, ובעמודה השנייה מוסרים גם 20 האגנים הגדולים.

מרכז כיפת הספירה	מוסרים SPA-ימות ו	גם האגנים מוסרים
90° מזרח — החצי המאסף	249	252
180° — הצד הרחוק	203	221
90° מערב — החצי המוביל	139	175
0° — הצד הקרוב	135	148

צפיפות מכתשים של 20 ק"מ ומעלה למיליון קמ"ר בארבע כיפות ספירה ברדיוס 30° על קו המשווה.

את הטבלה קוראים מלמעלה למטה: השורות מסודרות מכיפת הספירה הצפופה ביותר אל הדלילה ביותר, והצבע דוהה עם הצפיפות. החצי המאסף, 90° מזרח, מחזיק כ-250 מכתשים של 20 ק"מ ומעלה על כל מיליון קמ"ר של קרקע; החצי המוביל, 90° מערב, והצד הקרוב, 0° , מחזיקים 135–175. העמודה השנייה מסירה גם את האגנים הגדולים; היא מעלה את כיפות הספירה הדלות יותר יותר מאשר את זו של החצי המאסף, משום שהאגנים מחקו יותר מהמכתשים שלהן, אבל אינה משנה את הסדר.

החצי המאסף הוא הצפוף ביותר והחצי המוביל בין הדלילים ביותר, בסדר שהטבלה של K.4§ מנבאת. הניבוי פועל כך. הגוף המחובר הסתובב עם כדור הארץ. חומר שזרק מהחצי המאסף שלו ירד בזמן שהחצי הזה התרחק ממנו, ולכן השיג את הקרקע ברכות ונשאר; חומר שנזרק מהצד הרחוק פיגר מעט אחרי הסיבוב ונסחף גם הוא לעבר 90° מזרח. לכן החצי המאסף אסף את החומר הנפלט שלו עצמו ואת זה של הצד הרחוק. החצי המוביל נע הלאה אל תוך מה שזרק, כמו רץ הנע אל תוך גשם, ונפגע בעוצמה רבה יותר, אבל לא בתדירות רבה יותר.

ההבדל נמצא במכתשים הקטנים והבינוניים: מתחת לכ-70 ק"מ החצי המאסף מחזיק פי 1.2 עד 2.4 מאוכלוסיית החצי המוביל בכל תחום גודל, ומעל זה השניים דומים, או שהחצי המוביל עשיר יותר. זה מה שהמודל מצפה לו: החומר הנפלט של הגוף עצמו היה חלש, ויצר את המכתשים הקטנים והבינוניים; המכתשים הגדולים ביותר נוצרו בפחיסות, מהפליטות החזקות של אותו שלב, והם פזורים באופן אחיד יותר. התפלגות הגדלים מצביעה לאותו כיוון: האוכלוסייה ב-90° מזרח מוסטת לעבר מכתשים קטנים יותר, בפקטור של 0.75–0.81 לעומת 90° מערב, כפי שנחיתות רכות יותר של אותה מסה היו יוצרות, אף שהרווח של הפקטור הזה עדיין כולל את האחד. פקטור הקטן מאחד פירושו שאותה אוכלוסייה של נחיתות יצרה מכתשים קטנים מעט יותר על החצי המאסף; משום שהרווח שלו עדיין כולל את האחד, המדד הזה תומך בקריאה אבל אינו מכריע אותה לבדו עדיין. הצפיפות ב-90° מזרח נקראת גם דרך הימות של אותו חצי (מאמר 5); שתי הקריאות הן אחת, משום שהימות הם פתחים והפתחים זורקים.

מאחורי הקלעים. גרסה מוקדמת של הספירה הזאת כינתה את 90° מזרח הפנים המובילות, והניחה שהגוף המחובר משיג חומר שפיגר מאחוריו. לפי המוסכמה של הסדרה, 90° מזרח הוא החצי המאסף, והעודף שנספר שם קיבל שם שגוי. קריאת המעופים מהפתחים של הגוף עצמו, ולא מגוף האם, הציבה את העודף במקומו והוסיפה את הניבוי השני, של עוצמת הנחיתה.

STUDY 1 מחקר 1

שלב 1 • הגדרת שאלת המחקר והבעיה

התופעה. המכתשים הגדולים של הירח אינם פזורים באופן אחיד בקו האורך. **הפער בידע.** הספרות מצפה לעודף בחצי המוביל, 90° מערב, משום שהירח נע אל תוך הגופים שבדרכו; המודל מצפה לעודף בחצי המאסף, 90° מזרח, משום שהחומר הנפלט של הגוף עצמו נפל בחזרה לעברו (K.48). ספירה נקייה, המסירה את הימות — שמוחקים מכתשים — צריכה להכריע ביניהם. **שאלת המחקר:** כשהימות ו-South Pole–Aitken מוסרים מכל אזור, איזה מארבעת קווי האורך מחזיק הכי הרבה מכתשים של 20 ק"מ ומעלה, והאם ההבדל נמצא במכתשים הקטנים או בגדולים?

שלב 2 • סקירת ספרות (רקע מדעי)

עבור גופים שבאים מבחוץ, ירח בסיבוב סינכרוני פוגש יותר מהם בצד המוביל שלו; מודלים של ההפצצה בימינו מנבאים עודף של עשרות אחוזים בצד המוביל [S22, S23]. ירח בסיבוב סינכרוני הוא ירח שמסתובב פעם אחת על צירו בכל הקפה, ולכן מפנה תמיד את אותם פנים אל כדור הארץ; הצד המוביל שלו פוגש אז תמיד ראשון את הגופים הבאים לקראתו, כמו שהשמש הקדמית של מכונת בנסיעה אוספת יותר גשם מהחלון האחורי. העודף משמש לתיקון הכרונולוגיה של מכתשי הירח [S22]. ספירה בכיפות ספירה שוות על קטלוג גלובלי [S6] היא השיטה המקובלת. **מה חדש כאן:** ארבעת קווי האורך נספרים זה לצד זה, הימות ו-SPA מוסרים מכל כיפת ספירה, וגם האגנים הגדולים מוסרים, כך ששום אזור אינו מועדף בשל מה שנמחק בו.

שלב 3 • ניסוח השערת המחקר

החצי המאסף, 90° מזרח, מחזיק יותר מכתשים של 20 ק"מ ומעלה מהחצי המוביל, 90° מערב; העודף נמצא בגדלים הקטנים והבינוניים, שנוצרו בידי החומר הנפלט של הגוף עצמו, ולא במכתשים הגדולים ביותר.

שלב 4 • מערך המחקר (מתודולוגיה)

סוג המחקר: כמותי; מכתשים נספרים ליחידת שטח ומושווים בין אזורים. **המדגם:** המכתשים של 20 ק"מ ומעלה בקטלוג [S6] Robbins בארבע כיפות ספירה ברדיוס 30° על קו המשווה, שמרכזיהן ב-0°, ב-90° מזרח, ב-180° וב-90° מערב. **הכלים:** הקטלוג, מפת הימות של LROC, מסכה של SPA ושל 20 האגנים הגדולים, וקוד הסופר מכתשים ושטחים על הכדור. מסכה היא מפה של האזורים שיש להשמיט: כל מכתש וכל פיסת שטח הנופלים בתוכה מוסרים מהספירה לפני שהצפיפות מחושבת. הטבלה נותנת את הנימוק לכל בחירה.

בחירה	מדוע, במילים פשוטות
כיפות ספירה שוות בגודלן על קו המשווה	כדי שקו הרוחב, המצופף מכתשים לעבר הקטבים, יהיה זהה בכל הארבע
הימות מוסרים מכל כיפת ספירה	הימות כיסו את המכתשים שמתחתם; כיפת ספירה שיש בה יותר ים הייתה נראית דלה יותר מסיבה זו בלבד
SPA והאגנים הגדולים מוסרים	אגן ענק מחק את המכתשים שבתוכו; הסרתם שומרת על השוואה של דומה לדומה
צפיפות למיליון קמ"ר של הקרקע שנותרה	לאחר המסכות נשארים לכיפות הספירה שטחים שונים; הצפיפות הופכת אותן לברות השוואה

שלב 5 · איסוף הנתונים (ביצוע המחקר)

בכיפת הספירה של 90° מזרח, 582 מכתשים על 2.34 מיליון קמ"ר של קרקע; ב- 90° מערב, 316 על 2.27; ב- 180° , 424 על 2.09; ב- 0° , 193 על 1.43. כשגם האגנים מוסרים: 370 על 1.47, 308 על 1.76, 368 על 1.67 ו-154 על 1.04. הצפיפויות הן הטבלה שבראש הסעיף. כל צפיפות היא הספירה חלקי השטח: 582 מכתשים על 2.34 מיליון קמ"ר נותנים 249 למיליון קמ"ר. לכיפת הספירה של הצד הקרוב נשארת הכי מעט קרקע, 1.43 מיליון קמ"ר, משום שרובה ים והוסתר במסכה.

שלב 6 · ניתוח הנתונים ועיבודם

האם ההבדל גדול מן המקרה? ספירה של מכתשים מתפזרת בערך בשורש הריבועי שלה; הרווח של יחס בין שתי צפיפויות נובע משתי הספירות. ספירה של 316 מכתשים, למשל, צפויה להשתנות בכ-18 ממדגם אחד למדגם אחר שסבירותו שווה; רווח הסמך של 95% הוא הטווח שבתוכו נמצא היחס האמיתי ברמת ביטחון זו. החצי המאסף מול החצי המוביל: 1.79 (רווח 95%: 1.56–2.05) כשהימות ו-SPA מוסרים, ו-1.44 (1.24–1.67) כשגם האגנים מוסרים. אף אחד מהרווחים אינו מגיע לאחד. יחס של אחד היה פירושו היעדר הבדל; רווח שנשאר מעל אחד פירושו שהעודף של החצי המאסף אינו מקרה של ספירה. משום שמכתשים מתקבצים סביב מקורותיהם, הרווח חושב שוב בדגימה חוזרת של תאים שלמים של 5° על 5° , ולא של מכתשים בודדים: 1.48–2.19, עדיין רחוק מאחד. דגימה חוזרת מגרילה את התאים שוב ושוב באקראי, עם חזרות, ומחשבת את היחס מחדש בכל פעם; הגרלת תאים שלמים שומרת כל מקבץ יחד, כך שמקבץ אינו נספר כמכתשים בלתי תלויים רבים, דבר שהיה מצר את הרווח יותר מדי. היכן נמצא ההבדל. כשמחלקים את המכתשים לתחומי גודל, החצי המאסף מחזיק פי 1.2 עד 2.4 ממכתשי החצי המוביל בכל תחום שמתחת לכ-70 ק"מ; מעל זה השניים דומים. צורת התפלגות הגדלים. האוכלוסייה ב- 90° מזרח מוסטת לעבר מכתשים קטנים יותר בפקטור של 0.75–0.81 לעומת 90° מערב; הרווח של הפקטור הזה עדיין כולל את האחד.

שלב 7 · הסקת מסקנות וכתובת הדוח

תוצאה. ההשערה נתמכת: החצי המאסף מחזיק הכי הרבה מכתשים, בפער שהמקרה אינו מסביר, והעודף נמצא בגדלים הקטנים והבינוניים. העודף בחצי המוביל שהספרות מצפה לו אינו נמצא. **מגבלות.** כיפות הספירה הן ארבע דגימות של פני השטח ואינן ממופות את כל עקומת קו האורך; ההסטה של התפלגות הגדלים עדיין אינה מובהקת. **כיווני מחקר נוספים.** ספירה ברצועות קו אורך צרות בכל קו רוחב, עם רווחים המביאים בחשבון את ההתקבצות, ואותה ספירה עבור מכתשים של 5–20 ק"מ.

C.4 תיעוד המכתשים הוא תיעוד הימות

תיעוד המכתשים הוא תיעוד הימות. אם הימות יצרו את המכתשים, צפיפות המכתשים היא מפה של המקומות שבהם הימות פעלו — הימות הנראים וכיפות ההזנה הקבורות של D.18 כאחד — והמכתשים האחרונים שנוצרו

הם אלה של הימות הפעילים האחרונים; מכתשים ישנים יותר שמתחתם נמחקו באותו חום. ים פעיל מפזר סביבו את המכתשים שלו — שפת Crisium מוקפת בהם — ובמקום שבו אין ימות ויש רק חום, מכתשים נמחקו ולא נוצרו חדשים. חומר שים זורק גם לנחות הרחק ממנו: מכתש הרחוק מכל ים עשוי להשתייך לים נראה או לכיפת הזנה קבורה. כיפת הזנה קבורה היא מקור שפעל מוקדם ומאוחר יותר כוסה בשכבות של הצד הרחוק, יחד עם המכתשים שיצר; היום היא נראית רק בשדה הכבידה (מאמר 5; D.1§).

התיעוד הוא האחרון שנכתב, לא הראשון. פני שטח שומרים את המכתשים שנחתו עליהם אחרי שקפאו בפעם האחרונה; מה שנחת קודם נמס או כוסה. הימות הגדולים של הצד הקרוב הם האחרונים מכולם: בשחרור הם נותקו מהלחץ של כדור הארץ; הם היו אז חמים ובצמיגות נמוכה, וקפאו לאט, מבחוץ פנימה, לאורך מאות מיליוני שנים — אחרי שרוב החומר החוזר כבר נחת. פני השטח שלהם חלקים ונושאים מעט מכתשים, לכל היותר שרידים פה ושם: Mare Imbrium מחזיק 10 מכתשים של 20 ק"מ ומעלה על 871,000 קמ"ר של רצפה, 11 למיליון קמ"ר, לעומת 205 על הרמות (מאמר 5, I.5§; בגרסה מוקדמת יותר יוחס למאמר 3, C.10§). לכן רצפת Imbrium נושאת בערך מכתש אחד על כל שמונה-עשר שנושא אותו שטח של רמות: היא קפאה אחרי שרוב המכתשים כבר נפלו.

5.C מבחן המקור

השאלה שהסעיף הזה עונה עליה היא אם מכתש נושא את החומר של הים שיצר אותו. אם כן, הימות אינם רק המקום שבו המכתשים נמצאים אלא גם המקום שממנו בא החומר שלהם.

מבחן המקור. חומר שים זורק נושא את הכימיה שלו. מכתש ליד ים הנושא את חתימת הים — ברזל, טיטניום, תוריום — נוצר בידי; מכתש שאין בו חתימה זו בא ממקום רחוק יותר. המבחן מנוסח ב-O.1§: המכתשים סביב כל ים נבחרים לפני שהכימיה שלהם נקראת, וחלקם של הנושאים את חתימת הים נמדד כנגד המרחק ממנו. בחירת המכתשים תחילה, וקריאת הכימיה שלהם רק אחר כך, מונעת מן התשובה לכוון את הבחירה, אפילו שלא במודע.

זהירות אחת בנויה בתוך המבחן, והיא נוגעת לעוצמה שבה נחת החומר החוזר. נחיתה חזקה חופרת וחושפת את הקרקע שמתחת, והמכתש מראה אז בעיקר את הכימיה של אותה קרקע; נחיתה רכה עשויה כמעט שלא לחשוף את הקרקע, ויותר מהחומר החוזר נשאר על פני השטח. עוצמת הנחיתה תלויה במקום: החצי המוביל, 90° מערב, קיבל את הנחיתות החזקות, והחצי המאסף, 90° מזרח, את הרכות. היא נמדדה לפי קו אורך, ופנים המכתש מחזיק את אותו חומר בשני החצאים (L.4§). לכן הזהירות הזאת אינה מפצלת את התוצאה: החומר שבתוך המכתש זהה, בין שהנחיתה הייתה חזקה ובין שהייתה רכה.

מבחן המקור, כפי שנמדד. הימות הם 34 הפתחים של מאמר 5, שזוהו על גרדיאנטי הכבידה, כל אחד מעל כיפת הזנה (34 במאמר 5, נספח A; מבחן הקרום שם השתמש ב-36 הסימונים המקוריים); המישורים הכהים שאין תחתם כיפת הזנה — Procellarum, Tranquillitatis, Fecunditatis וכדומה — אינם ימות אלא קרום שנמס במקומו (מאמר 5, C.2§), והם נקראים בנפרד. גרדיאנט הכבידה הוא מידת המהירות שבה הכבידה משתנה ממקום למקום; הוא חזק ביותר בשולי גוף צפוף שמתחת לפני השטח, ולכן משרטט את קו המתאר שלו. המבחן הורץ על 11,574 מכתשים של 5–60 ק"מ מחוץ לבזלת, סביב שישה ימות (Crisium, Imbrium, Moscoviense, Smythii, Serenitatis, Nectaris) ושלושה מישורים (Procellarum, Tranquillitatis, Fecunditatis), שנבחרו והוקפאו לפני שנקראה כל כימיה, עם 5,922 מכתשי ביקורת מותאמים במרחק של יותר מ-600 ק"מ מכל בזלת [S10]. הביקורות הן מכתשים באותם גדלים, הרחק מכל ים, במקום שבו אין לצפות לחומר של ים; הן נותנות את רמת הקרקע שאינה חייבת דבר לים. הברזל והטיטניום לקוחים ממפות מצלמת הרב-ערוצים של Kaguya, התוריום מ-Lunar Prospector:

מרחק מהשפה	ק"מ 0–50	50–150	150–300	300–600	ביקורות (<600)
------------	----------	--------	---------	---------	----------------

סביב ששת הימות					
2.30	3.40	3.28	3.54	5.96	FeO של הקרקע, 4–3 רדיוסים (אחוז משקלי)
2.37	3.30	3.17	3.33	5.88	FeO בתוך המכתש (אחוז משקלי)
–0.01	–0.13	–0.05	–0.10	–0.26	מכתש פחות הקרקע שלו, FeO
1.02	1.39	1.36	1.66	2.16	Th של החומר הנפלט (ppm; ערך אזורי)
סביב שלושת המישורים					
2.30	2.60	4.24	6.10	9.41	FeO של הקרקע (אחוז משקלי)
–0.01	+0.13	–0.07	–0.19	–0.11	מכתש פחות הקרקע שלו, FeO
1.02	1.61	1.99	2.65	3.13	Th של החומר הנפלט (ppm)

מבחן המקור: ברזל ותוריום סביב ששת הימות ושלושת המישורים, לפי מרחק מהשפה, מול ביקורות רחוקות.

כיצד לקרוא את הטבלה. העמודות הן המרחק משפת הים או המישור, הגדל משמאל לימין, והביקורות הרחוקות בעמודה האחרונה; עוצמת הכתום מראה כמה חומר של ים מחזיקה כל משבצת, והיא דוהה ככל שמתרחקים. הקרקע נקראת בטבעת של 4–3 רדיוסי מכתש סביב כל מכתש, כשהבזלת הממופה מוסרת, כך שהיא הקרקע שלצד המכתש ולא הים עצמו. פנים המכתש נקרא בתוך השפה שלו. השורה מכתש פחות הקרקע שלו נקראת מכתש אחר מכתש, כל מכתש מול הקרקע שלו עצמו; לכן היא אינה פשוט ההפרש בין שתי השורות שמעליה, שהן ערכים של טבעות שלמות. התוריום נקרא על החומר הנפלט, והוא ערך אזורי משום שהתאים של Lunar Prospector רחבים, רחבים יותר מרוב המכתשים.

סביב הימות הקרקע נושאת את הברזל של הים: פי שניים וחצי מהביקורות בטווח 50 ק"מ, ועדיין פי אחד וחצי מהן ב-300–600 ק"מ; המכתש עני מעט מהקרקע שלו בכל מרחק. במספרים: 5.96 אחוז משקלי FeO בטווח 50 ק"מ לעומת 2.30 בביקורות, ו-3.40 ב-300–600 ק"מ. התוריום עובר אותו מסלול, מ-2.16 ppm ליד השפה ל-1.02 בביקורות. ההפרש בין המכתש לקרקע שלו קטן, אבל סימנו זהה בכל מרחק ליד ים, והוא כמעט נעלם בביקורות (–0.01). הוא אינו משנה את התוצאה העיקרית, דעיכת החתימה של הים עם המרחק; מה ההבדל מודד, וכיצד המודל קורא אותו, מוצג ב-L.2§.

סביב המישורים הקרקע עשירה יותר ליד השפה ויורדת לרמת הביקורות הרחק מהם: המישורים לא זרקו ולא שפכו דבר, והעודף שלצידם אינו מגיע רחוק. הברזל שלהם מתחיל גבוה יותר, 9.41 אחוז משקלי בטווח 50 ק"מ, ויורד ל-2.60 ב-300–600 ק"מ, כמעט ה-2.30 של הביקורות; סביב הימות נשאר עודף באותו מרחק. ההבדל בטווח הוא ההבדל בין פתח למישור: פתח זרק את החומר שלו מאות קילומטרים, והימות, מלבד ימות המגע, גם שפכו את ההתכה שלהן מעבר לשוליהן; מישור של קרום שנמס במקומו לא זרק ולא שפך דבר.

המחקר. המחקר שמאחורי מבחן המקור, מחקר 2, מוצג שלב אחר שלב ב-L.1§.

c.6 גודל המכתש ומסת הגוף החוזר

השאלה שהסעיף הזה עונה עליה היא כמה גדול היה צריך להיות גוף חוזר כדי ליצור מכתש בגודל נתון על גוף האם. היא חשובה משום שגוף האם שונה מהירח של היום בשני אופנים: הכבידה שלו הייתה חזקה יותר, דבר שמקטין מכתש עבור אותה מכה, והנחיתה הייתה איטית מזו של אסטרואיד, דבר שגם הוא מקטין אותו. לכן מכתש באותו גודל דרש גוף חוזר כבד יותר. הכלי הוא חוק קנה מידה: כלל, המותאם לניסויים, הקושר את גודל המכתש לגודל ולמהירות של מה שיצר אותו ולכבידה של המטרה.

בחוק קנה מידה אידיאלי במשטר הכבידה, כשתכונות החומר האחרות קבועות:

$$D \propto d_p^{1-\beta} \left(\frac{v^2}{g} \right)^\beta, \quad \beta = \frac{\mu}{2+\mu}.$$

כאן D הוא קוטר חלל החפירה — הבור שנחפר לפני שהדפנות גולשות — d_p הוא קוטר הגוף החוזר, v מהירות הנחיתה שלו ו- g הכבידה של המטרה. האיבר v^2/g אומר שנחיתה מהירה יותר חופרת רחב יותר, וכבידה חזקה יותר מרסנת את המכתש. המעריך μ הוא תכונה של חומר המטרה, הנמדדת בניסויים: גבוה יותר למטרה מוצקה ולא נקבובית, ונמוך יותר למטרה רופפת או נקבובית; מאמר זה בוחן את הערכים 0.35 ו-0.55, ו- β נגזר ממנו. משטר הכבידה פירושו שגודל המכתש מוגבל במשקל החומר שיש להרים החוצה, ולא בחוזקו, וזה המצב עבור מכתשים ברוב קילומטרים.

מכאן, עבור אותו קוטר חפירה:

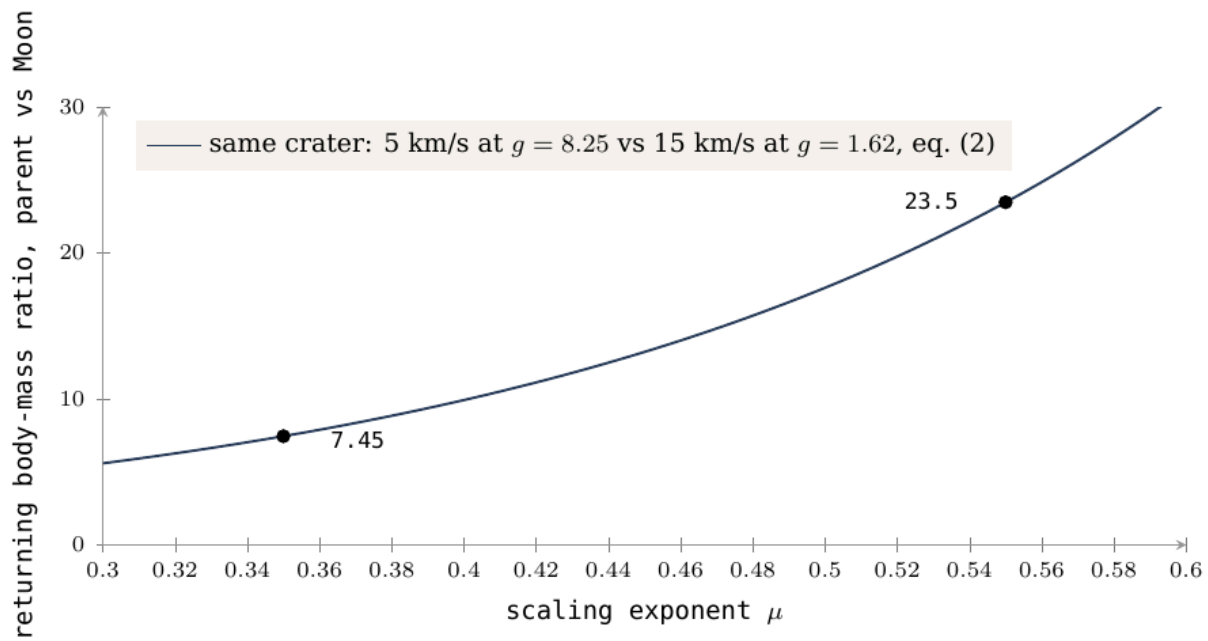
$$m_p \propto g^{3\mu/2} v^{-3\mu}.$$

משוואה (2) נובעת מ-(1) כשמחזיקים את D קבוע וכותבים את המסה m_p של הגוף החוזר כנפחו, הגדל כמו(2) d_p^3 . היא אומרת שהמסה הנדרשת גדלה עם הכבידה של המטרה ויורדת עם מהירות הנחיתה: נדרשת מכה כבדה יותר במקום שבו הכבידה חזקה יותר ובמקום שבו הנחיתה איטית יותר.

כשמשווים גוף פוגע חיצוני במהירות 15 ק"מ/ש' בכבידה 1.62 לנחיתה במהירות 5 ק"מ/ש' בכבידה 8.25, מתקבל יחס מסות של כ-7.45 עבור $\mu = 0.35$, וכ-23.47 עבור $\mu = 0.55$. המקרה הראשון הוא הקריאה של הספרות: גוף שבא מבחוץ ונוחת על הירח של היום, שכבידתו 1.62 מ"ש². השני הוא של המודל: חומר חוזר הנוחת במהירות 5 ק"מ/ש' על גוף האם ברדיוס הפליטה, שם הכבידה הייתה 8.25 מ"ש². הכבידה גדולה בערך פי חמישה והמהירות קטנה פי שלושה, ושתיהן מעלות את המסה הנדרשת; לכן היחס נע בין 7 לכ-23, לפי μ . אלה מבחני רגישות של חוק קנה המידה [S5], ולא שחזור מסה של מכתשים מסוימים. מקדם המטרה, צפיפות הגוף החוזר, החוזק, השכבתיות והמעבר מחלל החפירה אל המכתש הסופי דורשים כיוול.

המבחן הזה חשוב משום שהמכתש המוצע נוצר על גוף האם לפני שהועבר. אין לחשב אותו באופן אוטומטי בכבידה הירחית של היום; משנוצר, הוא נישא על הקליפה ושומר על גודלו (מאמר 3, B.6§; מאמר 7, D.5§). צפיפות נמוכה של המאגמה אינה קובעת את הנקבוביות של פני הקרום או את ה- μ שלהם. צפיפות הגוף כולו אינה אומרת דבר ישיר על מידת הרפיפות של השכבה העליונה במקום שבו נוצר המכתש, ואותה שכבה היא שקובעת את μ . לכן כמה מהקרום בנו הגופים החוזרים אינו נקבע כאן: חסרים קטלוג משוחזר, כיוול לכל מטרה וחלק המסה שנשמר. כל אחד משלושת אלה הוא דרישה כדי להפוך את הרגישות לתקציב מסה, והם מפורטים עם העבודה ההמשכית.

איור 2 משרטט את משוואה (2) כעקומה: הציר האופקי הוא מעריך קנה המידה μ , האנכי הוא יחס המסות, ושתיהן הנקודות מסמנות את הערכים שחושבו למעלה. המסר שלו הוא תלילות העקומה: לאורך הטווח הסביר של μ היחס משתנה פי שלושה, ולכן יש לכייל את המטרה לפני שמייחסים מסה למכתש כלשהו.



איור 2. מסת הגוף החוזר הנדרשת לאותו קוטר חפירה על גוף האם (5 ק"מ/ש', $g = 8.25$) ביחס לירח של היום (15 ק"מ/ש', $g = 1.62$), כפונקציה של מעריך קנה המידה (C.6§). זוהי רגישות של חוק קנה המידה [S5], ולא כיול למטרה סילית חמה ושכבתית.

מה שיש בידינו עכשיו: מקור המכתשים קיבל שם (הימות וכיפות ההזנה הקבורות), ספירתם לפי קו אורך, שבה החצי המאסף הוא הצפוף ביותר, הברזל של הים שנמצא בקרקע סביב כל ים ודועך עם המרחק, וקנה המידה של הגוף החוזר, התחום בידי רגישות ועדיין לא בידי כיול.

חלק D — המכתשים, הנראים והקבורים

הבעיה

לא כל מכתש שנוצר נראה היום. **הגישה:** המכתשים נספרים במקום שבו הם מונחים על הקרקע, במקום שבו נקברו יחד עם מקורות הצד הרחוק, ובמקום שבו רצפות הימות כיסו אותם — כל אחד מול היבשה שסביבו, כשהימות מוסרים משני הצדדים.

חלק C הראה שהימות הם מקור החומר החוזר, כך שצפיפות המכתשים היא מפה של המקומות שבהם פעלו הימות. מפה כזאת אפשר לקרוא רק אם יודעים אילו מכתשים אבדו ממנה. חלק זה סופר את המכתשים החסרים. מכתש יכול להיעלם מן העין בשתי דרכים שונות, והמודל שומר לשתייהן שתי מילים שונות.

קבור משמש כאן רק לצד הרחוק, ורק יחד עם המקור. כיפת הזנה שפעלה מוקדם ואחר כך נפסקה כוסתה, עם כל מה שסביבה, בשכבות שבנו מאוחר יותר את הצד הרחוק; המכתשים שיצרה היו מונחים על אותה קרקע ושקעו יחד איתה. דבר מהם אינו נראה; את הכיפה שמתחת מוצאים בכבידה שלה בלבד (D.1§).

מומס משמש לרצפות הימות. ים הוא פתח מעל כיפת הזנה, ובזמן שהיה פעיל רצפתו הייתה נזלית או רכה. חומר חוזר שנחת עליה יצר מכתש בקרקע שעוד לא קפאה: המכתש שקע לתוך הרצפה ונסגר, ולכל היותר נראית ממנו היום הטבעת שלו, העומדת כמעט בגובה הים (D.2§). גם הספרות מכירה את הטבעות האלה, אבל קוראת להן מכתשים "קבורים" או "מוצפים": בקריאה שלה המכתש נחפר בפני שטח ישנים ומוצקים, ובזלת שעלתה זמן רב אחר כך מילאה אותו. שתי הקריאות נבדלות במה שבא קודם. בספרות המכתש עתיק מהבזלת; במודל המכתש נוצר בזמן שהבזלת עוד הייתה פעילה. מסיבה זו המאמר אינו קורא לטבעת על רצפת ים "קבורה"; המילה מופיעה להלן רק במקום שבו מתוארת קריאת הספרות. שתי הקריאות גם משאירות עקבות שונים — במסה שמתחת למכתש (D.3§) ובשפה שלו (E.6§) — ואלה נבדקים.

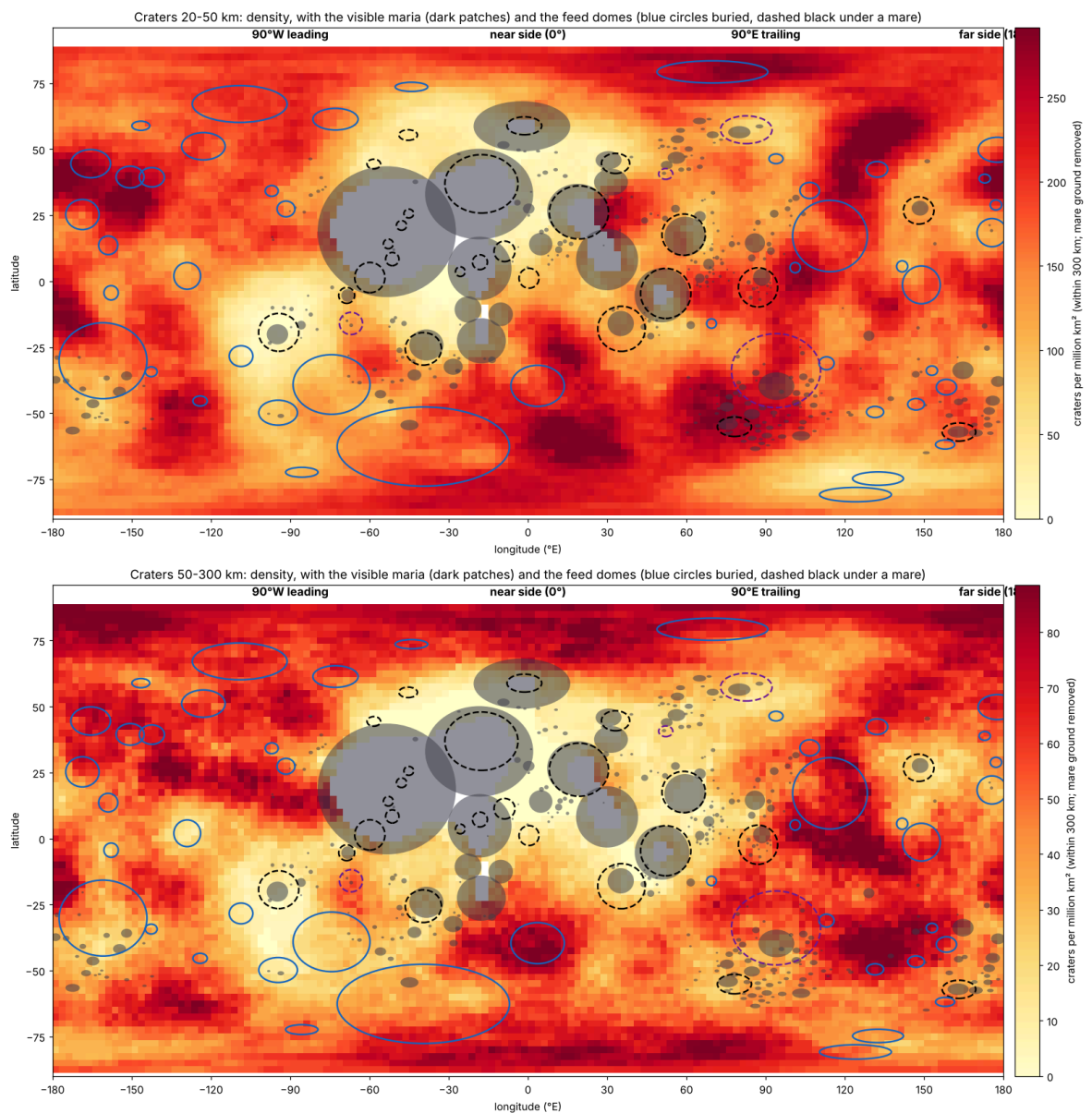
D.1 מכתשים שנקברו יחד עם מקורות הצד הרחוק

השאלה של סעיף זה היא אם המכתשים שיצרו המקורות הנסתרים של הצד הרחוק שקעו יחד איתם, ואם המכתשים הגדולים הנראים היום תלויים בימות הנראים בלבד.

המקורות שכבר אינם נראים. הימות הנראים אינם המקורות היחידים. מאמר 5 (D.4–D.5§) מוצא 73 כיפות הזנה בשדה הכבידה: גופים צפופים ועגולים, כל אחד מהם השארית הקפואה של החומר שעלה מתחת לפתח. מתוך 40 שבצד הרחוק, 36 קבורות מתחת לרמות בהירות, עם אותו ברזל ואותו תוריום מעליהן כמו סביבן, ועם קרום עבה יותר ב-8–13 ק"מ. שתי העובדות אומרות אותו דבר: פני השטח מעל הכיפות האלה הם הכיסוי הרגיל של הצד הרחוק, שהונח עליהן אחרי שהפסיקו לפעול, והקרום העודף הוא עובי הכיסוי הזה. מקור שפעל מוקדם, בתקופת הפחיסות, ונפסק, כוסה בשכבות שבנו את הצד הרחוק — הסיאל של גוף האם והחומר החוזר, שהונחו שכבה על שכבה (מאמר 3, B.7§) — והמכתשים שיצר כוסו יחד איתו. לכך יש תוצאה שאפשר למדוד. מקור מפזר מכתשים סביבו, ולכן מקור פעיל שנשאר גלוי היה מוקף בהמון מכתשים. סביב הכיפות הקבורות המכתשים אינם מתקבצים: צפיפותם על הכיפה וסביבה שווה לזו שרחוק יותר או נמוכה ממנה (0.95–0.48 מזו שעל הקרקע במרחק 3–5 רדיוסים), משום שהמכתשים שנוצרו בזמן נקברו יחד איתן. יחס של אחד היה פירוש "כמו על הקרקע שרחוק יותר"; כל ערך כאן שווה לו או נמוך ממנו.

המכתשים הגדולים. המכתשים הגדולים, בקוטר 20 ק"מ ומעלה, מופו לפי צפיפותם על פני הירח כולו, כשקרקע הימות הוסרה, והימות הנראים וכיפות ההזנה הונחו על המפה (איור 3). קרקע הימות מוסרת משום שרצפת ים איבדה את המכתשים שלה מסיבה משלה (D.2§); השארתה הייתה גורמת לכל אזור שיש בו ימות להיראות דל במכתשים, ומערבבת בין שתי השאלות. הקרקע הצפופה ביותר שלהם נמצאת בצפון הצד הרחוק, בין 140° מערב ל-180° ובין 120° מזרח ל-150° מזרח, בדרום הצד הקרוב מתחת ל-Nectaris ול-Nubium, ובדרום-מזרח הצד הרחוק; הדלילה ביותר נמצאת סביב הימות הגדולים של הצד הקרוב וסביב Orientale. הרחק מהימות של היום המכתשים הגדולים צפופים יותר, לא דלילים יותר: לקוטר 10–50 ק"מ, 467 למיליון קמ"ר בטווח 150 ק"מ משפת ים, לעומת 1,040 מעבר ל-1,000 ק"מ — יותר מפי שניים רחוק מהימות מאשר לידם. אין בכך כדי להפוך אותם לזרים לימות הנראים: מה שים משליך יכול לנחות רחוק ממנו, כמו אבן שנזרקה בכוח ונחתת רחוק מהיד. המכתשים הגדולים הנראים היום באים מכיפות ההזנה משני הסוגים — הכיפות הקבורות של הצד הרחוק והימות הנראים של היום.

מדוע מקורות מסוימים יצרו את המכתשים הגדולים ביותר — גם זה חלק מאותה היסטוריה. המים הגיעו מאוחר: ההתמיינות — מיון החומר של גוף האם לפי צפיפותו ולפי מה שהוא נושא — התקדמה לאורך הבנייה, והזרימות המאוחרות היו העשירות יותר בחומרים נדיפים (מאמר 3, B.7§); ים עשיר בחומרים נדיפים השליך את החומר רווי המים שיצר את המכתשים הגדולים ביותר של תקופת הפחיסות (מאמר 3, B.6§). הצד השני של אותו מיון הוא הברזל: ככל שהשכבה עמוקה יותר, יש בה יותר ברזל, וכשהחומרים הנדיפים עזבו, החומר הכבד נשאר — כיפת ההזנה הקפואה היא הגוף הצפוף והעשיר ביותר בברזל מכולם. לכן אפשר למצוא את הכיפות בשדה הכבידה גם במקומות שבהם דבר על פני השטח אינו מראה אותן.



איור 3. צפיפות המכתשים הגדולים, 20–50 ק"מ (למעלה) ו-300–500 ק"מ (למטה), בטווח 300 ק"מ מכל נקודה, כשקרקע הימות הוסרה ([S16] Wang & Wu 2021); הימות הנראים באפור כהה (משורטטים כעיגולים בשטחם) וכיפות ההזנה של מאמר 5 (כחול: קבורות; שחור מקווקו: מתחת לים פתוח).

כיצד לקרוא את איור 3: כל נקודה במפה צבועה לפי מספר המכתשים הגדולים שנמצאים בטווח 300 ק"מ ממנה, כך שקרקע צפופה בולטת ככתמים בהירים ורחבים וקרקע דלילה ככתמים כהים. השוו את הכתמים לשכבות שהונחו עליהם. הכתמים הצפופים ביותר נופלים בצפון הצד הרחוק ומתחת ל-Nectaris ול-Nubium, בין קווי המתאר הכחולים של הכיפות הקבורות; הקרקע הכהה ביותר מקיפה את העיגולים האפורים של הימות הגדולים של הצד הקרוב. שני הלוחות, לשני טווחי גודל, מראים אותו דפוס.

STUDY 3 מחקר 3

שלב 1 · הגדרת שאלת המחקר והבעיה

התופעה. שדה הכבידה מראה גופים צפופים ועגולים מתחת לרמות בהירות, במקומות שבהם לא נראה ים, ורובם בצד הרחוק (מאמר 5, D.4§). **הפער בידע.** אם אלה מקורות שפעלו מוקדם וכוסו אחר כך, המכתשים שיצרו חייבים היו להיות מכוסים יחד איתם; והמכתשים הגדולים הנראים היום אינם יכולים להיות תלויים בימות

הנראים בלבד. **שאלת המחקר:** האם המכתשים מתקבצים סביב כיפות ההזנה הקבורות, והיכן על הירח נמצאים המכתשים הגדולים ביחס לימות הנראים ולכיפות הקבורות?

שלב 2 • סקירת ספרות (רקע מדעי)

ימות קבורים, "קריפטו-ימות" (cryptomaria), מוכרים ממכתשים בעלי הילה כהה שחפרו בזלת מתחת לכיסוי של רמות, וכן מהכבידה ומההרכב שלהם [S24]; הספרות קוראת אותם כזרימות לבה מוקדמות שכוסו בחומר הנפלט של אגנים מאוחרים יותר. הצפיפות הגלובלית של המכתשים הגדולים היא המדד המקובל לגילם של פני שטח: ככל שפני שטח חשופים זמן רב יותר, הם צוברים יותר מכתשים. **מה חדש כאן:** צפיפות המכתשים נקראת על כל כיפה קבורה ובסביבתה מול הקרקע שרחוק יותר, והמפה הגלובלית של המכתשים הגדולים נקראת מול הימות הנראים ומול הכיפות הקבורות יחד.

שלב 3 • ניסוח השערת המחקר

המכתשים שיצר מקור קבור בזמנו נקברו יחד איתו, ולכן המכתשים אינם מתקבצים על הכיפות הקבורות ובסביבתן; והמכתשים הגדולים הנראים היום באים משני סוגי המקורות, ולכן אינם דלילים ביותר הרחק מהימות הנראים.

שלב 4 • מערך המחקר (מתודולוגיה)

סוג המחקר: כמותי, המשווה צפיפויות בטבעות וברצועות מרחק. **המדגם:** 44 כיפות ההזנה הקבורות של מאמר (D.4§) 5 — 36 של הצד הרחוק ו-8 בשולי הצד הקרוב — וכל המכתשים בקוטר 20 ק"מ ומעלה בקטלוג Wang [S16] & Wu, כשקרקע הימות הוסרה. **הכלים:** שדה הכבידה של GRAIL לכיפות, מפת הימות של LROC, וקוד הממפה את צפיפות המכתשים בטווח 300 ק"מ מכל נקודה. הטבלה מביאה כל השוואה ואת הסיבה לה.

השוואה	למה, במילים פשוטות
על הכיפה לעומת 3–5 רדיוסי כיפה	אילו הכיפה פיזרה מכתשים ששרדו, הם היו מצטופפים לידה
בטווח 150 ק"מ משפת ים לעומת מעבר ל-1,000 ק"מ	אילו רק הימות הנראים יצרו את המכתשים הגדולים, המכתשים היו צפופים ביותר לידם
קרקע הימות מוסרת בכל מקום	הימות כיסו מכתשים; ההשוואה קוראת רק את היבשה

טבלה: ההשוואות של מחקר 3, והסיבה לכל אחת.

שלב 5 • איסוף הנתונים (ביצוע המחקר)

לכל כיפה קבורה נספרו על היבשה המכתשים שעליה ואלה שבטבעת של 3–5 רדיוסים. לצורך המפה נספרו המכתשים בקוטר 10–50 ק"מ ו-50–300 ק"מ בטווח 300 ק"מ מכל נקודה ברשת גלובלית, ונרשם מרחקם משפת הים הקרובה ביותר.

שלב 6 • ניתוח הנתונים ועיבודם

סביב הכיפות הקבורות. צפיפות המכתשים על הכיפות היא 0.48–0.95 מזו שעל הקרקע במרחק 3–5 רדיוסים: לעולם אינה גבוהה ממנה. במאגר המשותף של 44 הכיפות הקבורות, מול הטבעת שבשוליהן, עם רווחים שנמצאו בדגימה חוזרת של הכיפות: 0.93 (0.84–1.01) למכתשים בקוטר 2–10 ק"מ, 1.00 (0.92–1.08) ל-10–50 ק"מ ו-1.02 (0.81–1.29) ל-50–100 ק"מ. **מה הרווחים אומרים.** הדגימה החוזרת שואלת עד כמה התוצאה הייתה משתנה אילו נמדדה במקרה מערכת כיפות אחרת: הכיפות נשלפות שוב באקראי פעמים רבות, היחס מחושב מחדש בכל פעם, והטווח שבסוגריים מכיל את 95 התוצאות האמצעיות מכל 100. כל טווח מכיל את הערך אחד — "כמה מכתשים על הכיפה כמו סביבה" — ואף אחד אינו נמצא מעליו. בשום גודל אין עודף על הכיפות. **מול הימות הנראים.** למכתשים בקוטר 10–50 ק"מ, 467 למיליון קמ"ר בטווח 150 ק"מ משפת ים לעומת

1,040 מעבר ל-1,000 ק"מ: המכתשים הגדולים צפופים יותר הרחק מהימות הנראים, לא לידם. המפה. הקרקע הצפופה ביותר נמצאת בצפון הצד הרחוק ובדרום הצד הקרוב מתחת ל-Nectaris ול-Nubium, בין הכיפות הקבורות; הדלילה ביותר סביב הימות הגדולים של הצד הקרוב וסביב Orientale (איור 3).

שלב 7 · הסקת מסקנות וכתובת הדוח

תוצאה. שני חלקי ההשערה נתמכים: שום עודף מכתשים אינו מתקבץ על הכיפות הקבורות, והמכתשים הגדולים אינם קשורים לימות הנראים בלבד; הם באים משני סוגי המקורות. **מגבלות.** הקרקע הסמוכה לים נראה מכוסה בחלקה בחומר שלו עצמו, וזה מוריד את הספירה שם מסיבה משלו; וכיפה קבורה מזוהה בכבידה בלבד. מומחה עשוי לטעון שהספירה הנמוכה ליד הימות היא רק הכיסוי הזה. הטענה אינה הופכת את התוצאה: המכתשים אינם רק מעטים יותר בשפת הים, אלא צפופים יותר מפי שניים מעבר ל-1,000 ק"מ, הרחק מחוץ להישג ידו של כל כיסוי, והקרקע הצפופה ביותר נמצאת בין הכיפות הקבורות. **כיווני מחקר המשך.** היחס על כל כיפה עם הרווח שלו, ובדיקה אם המכתשים בגודל נתון מתקבצים סביב כיפות הצד הרחוק כשהכיפות ממוינות לפי חוזקן.

מה שיש בידינו עכשיו: בצד הרחוק אבדו מכתשים יחד עם המקורות שיצרו אותם, והמכתשים הגדולים שנותרו באים מהכיפות הקבורות ומהימות הנראים כאחד.

D.2 מכתשים שהומסו לתוך רצפות הימות

הדרך השנייה שבה מכתש אובד היא על רצפת ים. סעיף זה שואל כמה מהמכתשים שעל רצפות הימות נחתו בזמן שהרצפה עוד הייתה פעילה והומסו לתוכה, וכמה נוצרו אחרי שקפאה.

המבחן. כל מכתש בקוטר 10 ק"מ ומעלה שמרכזו נמצא על בזלת נלקח מקטלוג Wang & Wu [S16], הנותן את עומקו של כל מכתש ממודלי הגובה הגלובליים, ושווה לרצפת ים — בתוך הליבה של כיפת ההזנה שמתחת לאחד מ-34 הימות של מאמר 5 — או למישור, כלומר לבזלת שמחוץ לכל ים. להבדל יש משמעות: רצפת ים היא פני השטח של הפתח עצמו, מעל כיפת ההזנה שלו; מישור הוא קרום שהותך במקומו, בלי תעלה מלמטה. יחס העומק לקוטר של כל מכתש הושווה לזה של מכתשי הרמות באותו גודל, כשהבזלת הוסרה ממדגם הרמות. מכתשי הרמות משמשים כמדד למכתש רגיל, כזה שנוצר על קרקע מוצקה ונשאר כפי שנוצר. מכתש רדוד מ-95% ממכתשי הרמות בגודלו נחשב מומס: הוא נחת על הקרקע הפעילה, הומס לתוכה, ונראה רק כטבעת. מכתש רדוד מ-75% מהם הוא מרוח: צורתו שרדה, אבל רצפתו התמלאה וקירותיו התמוטטו. השאר הם חדים, ונוצרו אחרי שהקרקע קפאה. במילים אחרות, הכלל היה קורא מומסים רק ל-5 מכל 100 מכתשי רמות רגילים; שיעור גבוה בהרבה מזה על רצפות הימות אינו יכול להיות הפיזור הרגיל של עומקי המכתשים. מכתש שהומס ונעלם לתוך ים פעיל אינו מופיע בשום קטלוג; הוא נראה רק כהיעדר מכתשים על הרצפה (מאמר 5, G.28).

הטבלה שלהלן מביאה את התוצאה לפי אזורים. האזורים הם אלה של מאמר 3, המחלקים את הירח של היום לפי המקום שבו עמד כל חלק על הגוף בזמן שהיה מחובר. המגע הוא האזור שעוד היה מחובר לכדור הארץ בשחרור, האחרון להינתק והאחרון להתקרר; הגבעה היא האזור הרחב יותר סביבו, שישב מעל הקצה הרחב כשההתעגלות החלה; מעבר הוא שאר הירח. המגע נמצא בתוך הגבעה, ולכן המעבר מ"מעבר" אל "הגבעה" ואל "המגע" הוא התקדמות לעבר הקרקע שנשארה חמה הכי הרבה זמן. ההצללה עוקבת אחר הכיוון הזה: ככל שהכחול (רצפות הימות) או הכתום (המישורים) עמוקים יותר, כך קרובים יותר למגע. קראו את שיעור המומסים לאורך כל גוש, והשוו את העמודה האחרונה — המכתשים החדים, שנוצרו אחרי שהקרקע קפאה — ל-207 למיליון קמ"ר של הרמות בתחתית הטבלה.

שטח (קמ"ר)	מכתשים ≥ 10 ק"מ	מומסים	≥ 20 ק"מ למיליון קמ"ר	חדים ≥ 20 ק"מ למיליון קמ"ר
------------	----------------------	--------	----------------------------	---------------------------------

רצפות הימות

0	0	0	3	702,717	המגע
0	71.6	34 (71%)	48	363,245	הגבעה
8.6	51.8	15 (54%)	28	115,838	מעבר
0.8	27.1	49 (62%)	79	1,181,800	כל הרצפות

המישורים

2.3	33.2	135 (58%)	233	3,429,919	המגע
42.5	171.5	187 (44%)	424	1,317,550	הגבעה
123.5	329.3	33 (28%)	118	218,655	מעבר
18.3	83.0	355 (46%)	775	4,966,124	כל המישורים
	207				הרמות, בזלת הוסרה

טבלה: מכתשים מומסים וחדים על רצפות הימות ועל המישורים, לפי אזור. אזורי מאמר 3: המגע — בטווח 1,500 ק"מ מ-24.1° צפון 335.2° מזרח; הגבעה — בטווח 3,000 ק"מ מ-16.6° צפון 13.1° מזרח; מעבר — השאר.

הרצפות קפאו אחרונות. על רצפות הימות שלושה מכל חמישה מכתשים שנספרו הם מומסים (62%), ומבין המכתשים בקוטר 20 ק"מ ומעלה רק אחד, על כל 1.2 מיליון הקמ"ר של הרצפות, הוא חד: 0.8 למיליון קמ"ר, לעומת 18 על המישורים ו-207 על הרמות (205 ב-C.4\$ ובמאמר 5, שבהם מוסרים מן הרמות הפתחים ולא הבזלת הממופה: שטח רמות שונה במקצת). השיעור של 62% הוא המספר המרכזי של סעיף זה. הוא אומר שרוב המכתשים שהרצפות עוד מראות נוצרו בזמן שהרצפות היו פעילות: החומר החוזר עוד נחת כשהימות היו נזליים, והרצפות קפאו רק אחרי שרובו כבר ירד. המכתשים נוצרו בזמן שהימות היו פעילים, והומסו לתוך הרצפות לפני שקפאו. הספירה של המכתשים החדים אומרת אותו דבר מהצד השני: אילו הרצפות היו קופאות מוקדם ואז ממתינות, הן היו צוברות מכתשים חדים בקצב הקרוב לזה של הרמות; הן צברו כמעט אפס. על רצפות הימות של המגע, 703,000 קמ"ר, לא נותר אף מכתש בקוטר 20 ק"מ ומעלה, לא מומס ולא חד: הם נעלמו לתוך הים הפעיל, ושלושת המכתשים בקוטר 10–20 ק"מ שנותרו הם חדים — הגעות מאוחרות אחרי שהרצפה קפאה. ככל שמתקרבים למגע, המכתשים מומסים יותר: על המישורים שיעור המומסים עולה מ-28% מעבר לגבעה ל-44% על הגבעה ול-58% בתוך המגע; על רצפות הימות מ-54% מעבר ל-71% על הגבעה, ובתוך המגע המכתשים נעלמו. הסדר עוקב אחר החום: ככל שהקרקע עמדה קרוב יותר למגע, היא נשארה נזלית זמן רב יותר, ויותר מהמכתשים שנחתו עליה הומסו. רצפות הימות הן אפוא התייעוד האחרון של המכתשים, ומה שמונח עליהן נקרא בחלק M.

STUDY 4 מחקר 4

שלב 1 • הגדרת שאלת המחקר והבעיה

התופעה. מכתשים רבים על רצפות הימות נראים רק כטבעות: רצפותיהם עומדות כמעט בגובה הים. אחרים עומדים על הרצפה שלמים ועמוקים. **הפער בידע.** כמה מהמכתשים על רצפת ים הומסו לתוכה, וכמה נוצרו עליה אחרי שקפאה — הדבר לא נספר מול ביקורת באותו גודל, כשרצפות הימות מופרדות מהמישורים. תמונה פשוטה עוזרת: בריכה שקופאת. אבני שעווה שנופלות למים החמים נמסות ומשאירות טבעת על פני המים, או נעלמות לגמרי; אבנים שנופלות אחרי שהקרח נוצר נשארות מונחות מעליו, שלמות. ספירתן מגלה מתי נוצר הקרח ביחס לנפילת האבנים. **שאלת המחקר:** מבין המכתשים בקוטר 10 ק"מ ומעלה על רצפות הימות ועל המישורים, איזה שיעור הומס, כמה נוצרו אחרי שהקרקע קפאה, והאם השיעור משתנה ככל שמתקרבים למגע?

שלב 2 · סקירת ספרות (רקע מדעי)

מה ידוע. מכתשים הנראים על הימות רק כטבעות, “מכתשי רפאים” (ghost craters), מוכרים מאז המפות הראשונות של הירח, ומכתשים מתחת לימות הצד הקרוב, המתוארים בספרות כ”קבורים” [S21], נמצאו מאז בשדה הכבידה. הספרות קוראת אותם כמכתשים שנחפרו בידי גופים פוגעים חיצוניים בפני שטח ישנים יותר, ואחר כך הוצפו בבזלת שעלתה מאוחר יותר. צפיפות המכתשים הנספרים על פני ים משמשת לתיארוך פני השטח שלו [S20]. **מה חדש כאן.** רצפות הימות — הבזלת שמעל כיפות ההזנה — מופרדות מהמישורים, כל מכתש נמדד לפי עומקו מול מכתשי רמות בגודלו, והמכתשים המומסים והחדים נספרים במדגם אחד, לפי כלל אחד.

שלב 3 · ניסוח השערת המחקר

במודל רצפות הימות קפאו אחרי שרוב החומר החוזר כבר נחת (C.2§). להשערה שלושה חלקים. (א) רוב המכתשים הנספרים על רצפות הימות מומסים. (ב) המכתשים שנוצרו על הרצפות אחרי שקפאו מעטים, הרבה פחות מאשר על המישורים ועל הרמות. (ג) ככל שמתקרבים למגע, שבו הקרקע נשארה נזולית הכי הרבה זמן, המכתשים מומסים יותר, ועל הימות של המגע הגדולים שבהם נעלמים לגמרי.

שלב 4 · מערך המחקר (מתודולוגיה)

סוג המחקר: כמותי; מכתשים נספרים ונמדדים על מפות שהכינו חלליות, והספירות מושוות סטטיסטית. **המדגם:** 854 המכתשים בקוטר 10 ק”מ ומעלה שמרכזם על בזלת, 79 על רצפות הימות ו-775 על המישורים; **הביקורת:** מכתשי רמות באותו גודל, כשהבזלת הוסרה. **הכלים:** קטלוג מכתשים עם עומקים, מפת הימות של LROC, כיפות ההזנה של מאמר 5, וקוד המשייך ומסווג את המכתשים. הטבלה מפרטת כל בחירה ואת הסיבה לה.

רכיב	מה נבחר	למה, במילים פשוטות
רצפת ים	בזלת בתוך הליבה של כיפת ההזנה שמתחת לאחד מ-34 הימות	פני השטח של הפתח עצמו
מישור	בזלת מחוץ לכל ים	קרום שהותך במקומו, בלי תעלה
הביקורת	מכתשי רמות באותו גודל, בזלת הוסרה (24,080 מכתשים)	כדי לדעת איך נראה מכתש רגיל בגודל הזה
קטלוג המכתשים	Wang & Wu (2021) [S16]: מיקום, קוטר ועומק	הוא נותן את העומק של כל מכתש
המדד	העומק חלקי הקוטר	מכתש מומס רדוד ביחס לרוחבו: נשארה ממנו רק הטבעת

טבלה: רכיבי מערך המחקר של מחקר 4, והסיבה לכל אחד.

כיצד נקבע “מומס”. כל מכתש מושווה רק למכתשי רמות בגודלו, משום שמכתש גדול רדוד מטבעו ביחס לרוחבו יותר ממכתש קטן. הכלל: מכתש רדוד מ-95 מכל 100 מכתשי רמות בגודלו הוא מומס; רדוד מ-75 מכל 100 — מרוח; אחרת — חד. הטבלה שלהלן מתרגמת את הכלל לעומקים. לכל קבוצת גודל היא מביאה כמה מכתשי רמות קובעים את התקן, את יחס העומק לקוטר האופייני של מכתש רמות, ואת היחס שמתחתיו מכתש נחשב מומס. העמודה האחרונה מביאה דוגמה מחושבת. שימו לב כמה רחב הפער: מכתש בקוטר 15 ק”מ, שעומקו האופייני 1.2 ק”מ, נחשב מומס רק אם הוא רדוד מ-0.4 ק”מ — שליש מהעומק הרגיל. מכתש שנחשב מומס אינו רדוד במעט; הוא איבד את רוב עומקו, ומה שנשאר ממנו הוא הטבעת.

גודל	מכתשי רמות	עומק / קוטר אופייני	מומס מתחת ל-	דוגמה: נחשב מומס אם רדוד מ-
10–20 ק"מ	17,509	0.077	0.028	0.4 ק"מ למכתש בקוטר 15 ק"מ (עומק אופייני 1.2 ק"מ)
20–40 ק"מ	4,331	0.065	0.023	0.7 ק"מ למכתש בקוטר 30 ק"מ (אופייני 2.0 ק"מ)
40–80 ק"מ	1,707	0.051	0.016	1.0 ק"מ למכתש בקוטר 60 ק"מ (אופייני 3.1 ק"מ)
80 ק"מ ומעלה	533	0.034	0.012	1.4 ק"מ למכתש בקוטר 120 ק"מ (אופייני 4.1 ק"מ)

טבלה: הכלל "מומס" מתורגם לעומקים, לפי קבוצת גודל.

שלב 5 · איסוף הנתונים (ביצוע המחקר)

הכלל נקבע על מכתשי הרמות בלבד, לפני שסווג אף מכתש על הבזלת. לסדר הזה יש חשיבות: לא ניתן היה לכוון את הספים, אפילו בלי משים, כך שייתנו את התשובה הצפויה על הימות. אחר כך שויך כל מכתש לפי מרכזו לרצפת ים או למישור, קיבל את האזור שלו וסווג; שטח הרצפות והמישורים בכל אזור סוכם על פני הכדור. הספירות הן הטבלה שבראש הסעיף.

שלב 6 · ניתוח הנתונים ועיבודם

כמה מומסים. מתוך 79 המכתשים על רצפות הימות, 49 מומסים (62%), 18 מרוחים ו-12 חדים; מתוך 775 שעל המישורים, 355 מומסים (46%). לפי הכלל, מכתש רמות רגיל היה נחשב מומס 5 פעמים מתוך 100; על רצפות הימות זה 62 פעמים מתוך 100, ועל המישורים 46. כמה מעטים החדים. מבין המכתשים בקוטר 20 ק"מ ומעלה, אחד בלבד חד על כל רצפות הימות, 0.8 למיליון קמ"ר (בהתחשב במקרה בספירה של אחד, לכל היותר 4); על המישורים 18; על הרמות 207 מכתשים בגודל הזה. הסוגריים עונים על השאלה המתבקשת לגבי ספירה של אחד: מכתש בודד יכול היה לצאת במזל מקצב אמיתי גבוה במקצת, אבל לא מקצב של יותר מ-4 למיליון קמ"ר — ועדיין הרבה מתחת למישורים ולרמות. המגע. על 703,000 הקמ"ר של רצפות הימות של המגע לא נותר אף מכתש בקוטר 20 ק"מ ומעלה, לעומת 33 למיליון קמ"ר על המישורים של המגע; שלושת המכתשים בקוטר 10–20 ק"מ חדים. השינוי לעבר המגע. על המישורים שיעור המומסים עולה מ-28% מעבר לגבעה ל-44% על הגבעה ול-58% במגע (מבחן חי בריבוע על טבלת הספירות, הסתברות של כ-3 למיליון); על רצפות הימות מ-54% מעבר ל-71% על הגבעה (הסתברות 0.0003 כשהמגע כלול). מה המבחנים אומרים. מבחן חי בריבוע שואל: אילו שיעור המומסים היה באמת זהה בכל האזורים, באיזו תדירות המקרה לבדו היה מפזר את הספירות באופן לא אחיד כמו שהן? עבור המישורים התשובה היא כ-3 פעמים במיליון ניסיונות; עבור רצפות הימות, 3 פעמים ב-10,000. העלייה לעבר המגע אינה אפוא תאונה של מספרים קטנים.

שלב 7 · הסקת מסקנות וכתובת הדוח

תוצאה. שלושת חלקי ההשערה נתמכים. רוב המכתשים על רצפות הימות מומסים; החדים מעטים בערך פי מאתיים מאשר על הרמות ופי עשרים מאשר על המישורים; וככל שמתקרבים למגע המכתשים מומסים יותר, עד שעל הימות של המגע הגדולים שבהם נעלמו לגמרי. הרצפות קפאו אחרי שרוב החומר החוזר כבר נחת, וקפאו

מאוחר ליד המגע. **מגבלות.** המכתשים על רצפות הימות מעטים, ובמגע שלושה בלבד; עומקו של מכתש נקרא ממפות גובה, ומכתש קטן נמדד פחות טוב מגדול; מכתש משויך לרצפה לפי מרכזו; וטבעת של מכתש מעידה שהוא נחת לפני שהקרקע קפאה, אבל אינה אומרת בעצמה אם הומס או כוסה. הנקודה האחרונה היא זו שבה המודל והספרות נפרדים: טבעת היא מה ששתי הקריאות צופות, והעומק לבדו אינו יכול להכריע ביניהן. **כיווני מחקר המשך.** אם המכתשים כוסו בזרימה מאוחרת או הומסו במקום שבו נחתו — את זה מכריעות השפות שלהם (E.6§); אם המכתשים שנעלמו השאירו את המסה שלהם — זה נקרא ב-D.3§.

מה שיש בידינו עכשיו: כשלושה מכל חמישה מכתשים על רצפות הימות הומסו לתוכן, כמעט אף אחד לא נוצר אחרי שקפאו, והשיעור עולה לעבר המגע. הסעיף הבא שואל מה השאירו המכתשים המומסים מתחתם.

D.3 המסה מתחת למכתשים המומסים של הימות

מכתש שנחת על ים פעיל נכנס לתוכו ונעלם; מה שנראה ממנו על הרצפה הוא טבעת. אם החומר שנעלם השאיר אחריו את המסה שלו — את זה קראנו בשדה הכבידה, מתחת לכל מכתש, מול הקרקע שסביבו. זהו המבחן שיכול להפריד בין שתי הקריאות של טבעת. אם המכתש נחפר בקרקע מוצקה ומולא אחר כך בבזלת, כפי שהספרות גורסת, הבזלת שבו יוצרת גוף בצורת המכתש, ולגוף שיש לו צורה יש שפה. אם החומר החוזר שקע לתוך ים נוזלי והתערבב בו, כפי שהמודל גורס, הוא השאיר מסה עודפת בלי צורה ובלי שפה.

המדידה. מתחת לכל מכתש בקוטר 20 ק"מ ומעלה בצד הקרוב נקרא גובה בסיס הקרום ממודל הקרום של GRAIL [S31]. בסיס הקרום הוא הגבול בין הקרום הקל לבין המעטפת הצפופה יותר שמתחתיו; מודל הקרום ממקם אותו לפי הכבידה הנמדדת. במקום שבו הבסיס עומד גבוה יותר מאשר בסביבה, המעטפת הצפופה מתקרבת לפני השטח, ויש יותר מסה. מישור הותאם לקרקע שבמרחק 1.5–3 רדיוסים והוסר, והמרכז (עד 0.3 רדיוס) נקרא מולו; הסרת המישור מסלקת כל נטייה אזורית רחבה, כך שנשאר רק מה שנמצא מתחת למכתש עצמו. הימות הם 34 הפתחים של מאמר 5, כל אחד עם הליבה של כיפת ההזנה שלו; המישורים הם הבזלת שמחוצה להם.

הטבלה מביאה את ההרמה החציונית של בסיס הקרום מתחת לכל קבוצה, בק"מ. קראו אותה מלמעלה למטה, ושימו לב לשורה השלישית: אלה המכתשים המומסים כשהם נמדדים מול הרצפה שלהם עצמם, כשהכיפה שמתחת כבר הוסרה. ההצללה מסמנת את השורות השייכות לרצפות הימות.

מתחת למרכז (ק"מ של הרמת בסיס הקרום)	מכתשים	חציון
מכתשים מומסים על רצפות הימות	17	+3.0
נקודות אקראיות על אותן רצפות, באותם גדלים	לכל מכתש 50	+1.4
המכתשים מעל הרצפה שלהם עצמם	16	+0.8, 16 מתוך 13
מכתשים מומסים על המישורים, 20–	83	+0.08
מכתשי רמות, 20–40 ק"מ	2,636	–0.41

טבלה: ההרמה החציונית של בסיס הקרום מתחת למרכז המכתש, לפי קבוצה.

כיפת הזנה צפופה, ולכן כל נקודה על רצפת ים עומדת מעל יותר מסה מהקרקע שסביבה: נקודות אקראיות על אותן רצפות מראות +1.4. מסיבה זו אי אפשר לקרוא את המכתשים המומסים מול היבשה הפתוחה; יש לקרוא

אותם מול הרצפה שלהם עצמם. המכתשים המומסים נושאים יותר מהרצפה שלהם, בחציון של $+0.8$. מתחת למכתשים המומסים של המישורים אין לא עודף ולא חוסר; מתחת למכתשי הרמות, חומר קל ושביר משאיר חוסר. שלוש הקבוצות מסתדרות כפי שהמודל דורש: מסה עודפת במקום שבו החומר נחת על ים פעיל, אפס במקום שבו נחת על מישור שלא היה מתחתיו ים, והחוסר הקטן והרגיל של מכתש על קרקע מוצקה.

אין גוף עם שפה. גוף צפוף עם שפה חדה מתחת למכתש היה מניח טבעת של כבידה תלולה בשפתו. המבחן משתמש בשדה Bouguer של GRAIL [S31]: הכבידה הנמדדת אחרי שמשיכת התבליט הנראה חושבה והוסרה, כך שמה שנשאר מראה חומר צפוף או קל יותר מתחת לפני השטח. עליו, תלילות הכבידה בשפת כל מכתש, מול פנימו ומול מה שמחוצה לו, זהה מתחת למכתשים המומסים של הימות (חציון 1.04), מתחת לנקודות אקראיות על אותן רצפות (1.00), מתחת למכתשים המומסים של המישורים (1.04) ומתחת למכתשי הרמות (1.02). ערך של אחד פירושו שהכבידה אינה משתנה בשפה בתלילות רבה יותר מאשר בפנים ובחוץ; כל ארבע הקבוצות נמצאות במרחק של מאיות ספורות מאחד. שלושה מכתשים גדולים בולטים בנפרד — בקוטר 68, 122 ו-159 ק"מ — שבהם שפת המכתש עוד בולטת על הרצפה.

STUDY 14 מחקר 14

שלב 1 · הגדרת שאלת המחקר והבעיה

התופעה. על רצפות הימות מכתשים רבים נראים רק כטבעות (D.2§). **הפער בידע.** בספרות, טבעת על ים היא מכתש שהוצף בבזלת, והבזלת הממלאת אותו צריכה לשקול כגוף בצורת המכתש. במודל המכתש נכנס לים הפעיל ונעלם בו. אם החומר שנעלם השאיר מסה, ואם למסה הזאת יש צורה של גוף — הדבר לא נמדד מול הרצפה שסביב כל מכתש. **שאלת המחקר:** האם מתחת למכתשים המומסים של הימות יש יותר מסה מאשר מתחת לרצפה שסביבם, והאם יש לה השפה של גוף?

שלב 2 · סקירת ספרות (רקע מדעי)

מכתשים מתחת לימות הצד הקרוב, המתוארים בספרות כ"קבורים" [S21], נמצאו בשדה של GRAIL כטבעות כבידה, ונקראו כמכתשים שהוצפו בבזלת. מודל הקרום ושדה Bouguer הם אלה של משימת GRAIL [S31]. **מה חדש כאן:** כל מכתש נקרא מול נקודות אקראיות על הרצפה שלו עצמו, כך שהכיפה שמתחת לים מוסרת, והשפה של המסה נקראת בתלילות הכבידה.

שלב 3 · ניסוח השערת המחקר

החומר החוזר שנחת על ים פעיל נכנס לתוכו ונעלם, והשאיר את המסה שלו בים בלי צורה של גוף. מכאן: מתחת למכתשים המומסים של הימות יש יותר מסה מאשר מתחת לרצפה שלהם עצמם; מתחת למכתשים המומסים של המישורים, שבהם לא היה ים פעיל, אין; ולמסה אין שפה חדה.

שלב 4 · מערך המחקר (מתודולוגיה)

סוג המחקר: כמותי, עם שתי קבוצות ביקורת. **המדגם:** 17 המכתשים המומסים בקוטר 20 ק"מ ומעלה על רצפות הימות; **הביקורות:** 50 נקודות אקראיות על אותה רצפה לכל מכתש, באותו גודל, וכן המכתשים המומסים של המישורים ומכתשי הרמות באותם גדלים. הנקודות האקראיות עונות על השאלה "מה מראה כל נקודה על הרצפה הזאת?"; מכתשי המישורים והרמות עונים על השאלה "מה מראה מכתש במקום שבו לא היה ים פעיל?". **הכלים:** מודל הקרום ושדה Bouguer של GRAIL [S31], מודלי הגובה [S7], קטלוג Wang & Wu [S16], כיפות ההזנה של מאמר 5, וקוד הקורא כל מכתש בטבעות של הרדיוס שלו עצמו.

שלב 5 · איסוף הנתונים (ביצוע המחקר)

המכתשים סווגו לפי עומקם לפני שהכבידה נקראה (D.2§), כך שבחירת המכתשים לא יכלה לנטות לעבר תוצאת הכבידה. לכל מכתש נקרא המרכז מול הטבעת שבמרחק 1.5–3 רדיוסים, ואותו דבר נקרא ב-50 נקודות אקראיות

על בזלת בתוך אותה ליבת כיפה. תלילות כבידת Bouguer נקראה ב-0.8–1.2 רדיוסים מול 0.3–0.6 ו-1.5–2.0 רדיוסים — כלומר ברצועה סביב שפת המכתש, מול רצועה בתוכו ורצועה מחוצה לו. הערכים הם הטבלה של D.3§.

שלב 6 · ניתוח הנתונים ועיבודם

יותר מסה. המכתשים המומסים של הימות עומדים מעל הרצפה שלהם עצמם בחציון של $+0.8$ ק"מ, ב-13 מתוך 16 (מבחן Wilcoxon, הסתברות 0.04); העודף אינו גדל עם גודל המכתש אחרי שהרצפה הוסרה (מתאם דרגות 0.18). מבחן Wilcoxon שואל אם 16 ההפרשים, מכתש פחות הרצפה שלו, נוטים לצד אחד יותר ממה שהמקרה היה מאפשר אילו ההפרש האמיתי היה אפס; הסתברות של 0.04 פירושה שהמקרה היה נותן תוצאה חד-צדדית כזאת בערך 4 פעמים מתוך 100. מתאם דרגות של 0.18 חלש: מכתשים גדולים יותר אינם נושאים עודף גדול יותר באופן ברור. לא על המישורים. המכתשים המומסים של המישורים נושאים $+0.08$, לעומת -0.41 ברמות. אין שפה. התלילות בשפה היא 1.04 מתחת למכתשים המומסים של הימות לעומת 1.00 מתחת לרצפות שלהם (הסתברות 0.09), כמו בכל קבוצה אחרת. כאן הסתברות גבוהה היא התוצאה הצפויה: המקרה לבדו היה נותן הפרש גדול כמו 0.04 בערך 9 פעמים מתוך 100, ולכן השפות של המכתשים המומסים אינן תלולות מהרצפה שסביבם.

שלב 7 · הסקת מסקנות וכתיבת הדוח

תוצאה. ההשערה נתמכת: החומר שנחת על הימות הפעילים נעלם לתוכם והשאיר שם את המסה שלו, בלי צורה של גוף; על המישורים לא השאיר דבר. **מגבלות.** המכתשים מעטים ונמצאים על שבעה ימות, רובם על Smythii; העודף קטן ביחס לכיפה שמתחת; הכבידה מפרידה פרטים של כ-8 ק"מ, כך ששפה דקה יכולה לחמוק ממנה. **כיווני מחקר המשך.** אותה קריאה על ימות הצד הרחוק, ועל המכתשים בקוטר 10–20 ק"מ עם שדה בדרגה גבוהה יותר.

מה שחלק זה הראה: המכתשים שאינם נראים אבדו בשתי דרכים. בצד הרחוק הם נקברו יחד עם המקורות שיצרו אותם; על רצפות הימות הם הומסו לתוך הקרקע הפעילה — כשלושה מכל חמישה מאלה שעדיין נספרים שם — והשאירו מתחתם את המסה שלהם בלי צורה של גוף.

חלק E — 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. אותו טקסט מופיע כחלק G של מאמר 5, ומספור המחקרים משותף עם מאמר 5: המחקר המרכזי של חלק זה הוא מחקר 5 במאמר הזה ומחקר 8 במאמר 5.

החלקים הקודמים זיהו את הימות כמקור של החומר החוזר (חלק C), וספרו את המכתשים שכבר אינם נראים, ובהם אלה שנמסו לתוך רצפות הימות (חלק D). חלק זה מתבונן ברצפות האלה ישירות. במודל ים הוא פתח מעל כיפת הזנה (מאמר 5), ורצפתו היא פני 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 התייעוד 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 E.1 מראה את שלושת המצבים זה לצד זה על ים אחד. סעיף E.2 מודד את מצבו של כל מכתש בקוטר 3 ק"מ ומעלה על הבזלת של הצד הקרוב מול גודלו (מחקר 5). סעיפים E.3 ו-E.4 מציגים את שני הגורמים שהמודל קורא בתוצאה: התקררות הימות, והשינוי בחומר שהמשיך להגיע מכדור הארץ אחרי השחרור. סעיף E.5 מחבר את שניהם לרצף אחד בזמן. סעיף E.6 פונה אל המכתשים הגדולים שעל מישורי המגע, ששפותיהם נשחקו מלמטה (מחקר 15), ו-E.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 (מאמר 5, נספח A); מישור הוא בזלת שאין תחתיה כיפת הזנה, כמו Procellarum או Tranquillitatis.

E.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.

E.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 [S16], עם עומקו ממודלי הגובה הגלובליים, ושיוך לרצפת ים — בתוך ליבת כיפת ההזנה שמתחת לאחד מ-34 הימות של מאמר 5 (נספח A שם) — 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. אגנים של 300 ק"מ ומעלה, שהקטלוג מונה כמכתשים שמרכזם על רצפתם שלהם (Serenitatis, Nectaris, Humorum ואחרים), הוצאו מעמודת ה-+40 ק"מ; איתם, בגרסה קודמת, העמודה הייתה 1.5, 14, 40 ו-69.

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-2-5 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.

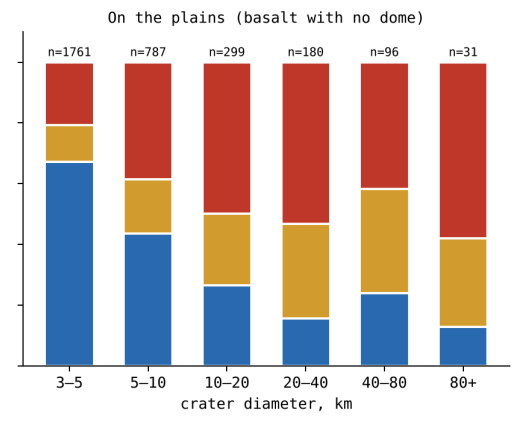
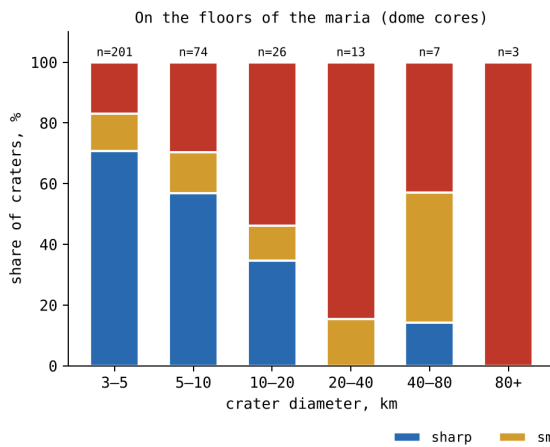
המצב הולך אחר הגודל. על רצפות הימות, המכתשים שנשארו:

גודל	מכתשים	חדים	מרוחים	מומסים
3-5 ק"מ	201	71%	12%	17%
5-10 ק"מ	74	57%	14%	30%
10-20 ק"מ	26	35%	12%	54%
20-40 ק"מ	13	0%	15%	85%
40-80 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 3-5 ק"מ ועד אפס מאלה של 20-40 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 40-80 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 E.3-E.5 מסבירים מדוע השניים רצים יחד.



איור 4. 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 (E.2§).

איור 4 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 של המגע, 82% מן המכתשים של 10–3 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 (E.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 (E.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 5 המחקר — מחקר 5

STEP 1 הגדרת שאלת המחקר והבעיה

התופעה. על רצפות הימות חלק מן המכתשים נמסו עד טבעת, חלקם מרוחים וחלקם חדים (E.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 שהספרות מתארת כקבורים בחלקם בבזלת מאוחרת משמשים זה מכבר למדידת עובי הבזלת: מכתש ששפתו עדיין עומדת מעל הזרימה מגלה כמה עמוקה הזרימה [S25]. הזרימות מתוארכות לפי ספירות של מכתשים שעליהן [S20]. הצמיגות של בזלות הימות נמדדה על דגימות שהובאו לכדור הארץ [S19].

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; צפיפיות 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; לצפיפיות, כל המכתשים בקוטר 2 ק"מ ומעלה על אותם משטחים, כששדות הקרניים הוסרו; **הביקורת:** מכתשים ביבשה באותם גדלים, בקו רוחב של עד 60° , כשהבזלת הוסרה. **הכלים:** הקטלוג של Wang & Wu [S16] עם העומקים שבו, מפת הימות של LROC, כיפות ההזנה של מאמר 5, נספח A, וקוד שממין כל מכתש לפי הכלל של E.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 מוין כל מכתש, שוין לרצפת ים או למישור, ונרשם מרחקו ממרכז המגע (24.1° צפון, 335.2° מזרח). הספירות הן הטבלאות של E.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).

E.3 הימות: טמפרטורה, צמיגות וזמן

מחקר 5 קבע את הדפוס. סעיף זה והבא אחריו מציגים את גורמיו: כאן, הרצפה שקולטת את המכתש; ב-E.4§, החומר שיוצר אותו. התכונה המרכזית של הרצפה היא *הצמיגות* שלה, ההתנגדות שלה לזרימה: למים צמיגות נמוכה, לדבש גבוהה יותר, לזפת 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 $Pa \cdot s \cdot 1$ ליד הליקווידוס שלהן [S19], כ- $1,200^{\circ}C$. הליקווידוס הוא הטמפרטורה שמעליה ההתכה נוזלית כולה; $Pa \cdot s \cdot 1$ 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- $1,050^{\circ}C$. 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 כהי 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 $\kappa \approx 10^{-6} m^2 s^{-1}$ היא הדיפוזיביות התרמית, λ קבוע מסדר גודל אחד שנקבע על ידי החום הכמוס, h (3) 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 הוזנו 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- $+60^{\circ}$ מ' ו-Imbrium ב- $+43^{\circ}$ מ' (מאמר 5, G.3§). 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. 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.

E.4 החומר המגיע: טמפרטורה, גודל ומרחק

השעון השני נמצא בחומר שנוחת. במודל כ-99% מן המכתשים נוצרים על ידי חומר חוזר מכדור הארץ (חלק B), 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 $G^{(4)}$ 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 4). 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 (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 שנוחת 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.

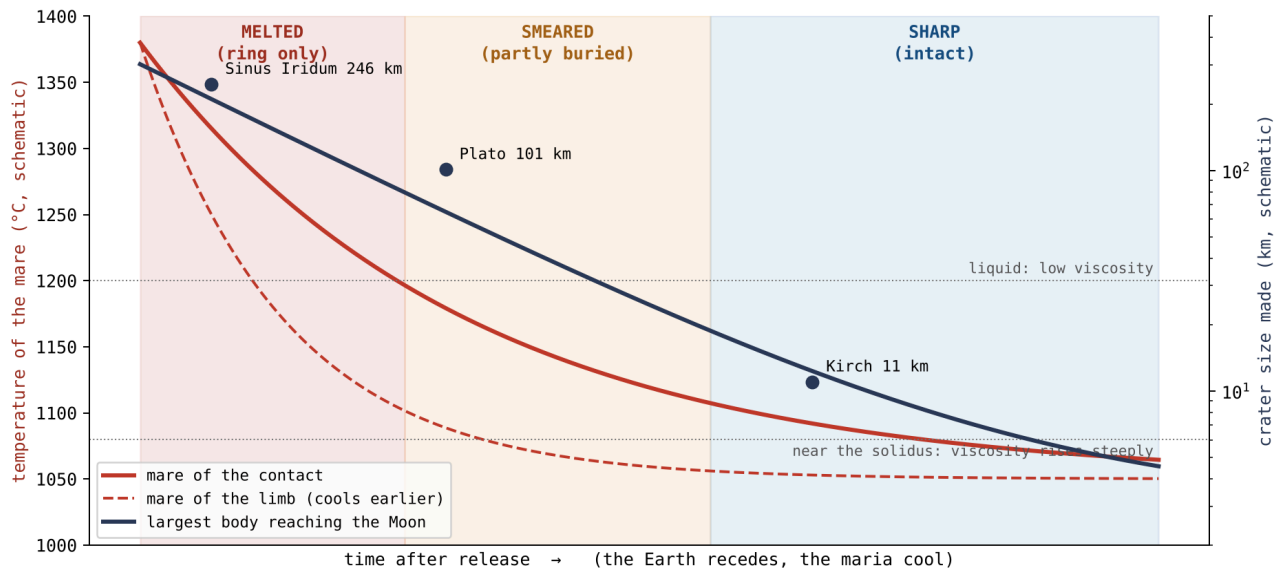
E.5 השרשרת בזמן

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 E.1§.



איור 5. 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 (E.5§).

איור 5 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.

E.6 השפה: נשחקה בחום או הוצפה

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 [S25, S32]; 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 שנזרק מכדור הארץ, פגש מישור חם; המישור שחק את השפה במקום שבו נגע בה, בצד שפונה אליו. הרכס עצמו הונמך והוקה. 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) +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) [S7], 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)	(+34 עד -32) -11	אין הבדל	(עד 2.8 0.3) +1.3°
יבשה, הצד הקרוב (77)	(+11 עד -18) -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 פירושם 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 ובזווית רחבה יותר. על המישורים שמעבר למגע וביבשה שני הצדדים נבדלים מעט, וההבדל בזווית נעלם כשמשתמשים רק במודל הגובה המפורט ביותר. לעומת המישורים שמעבר למגע, הזווית של המגע רחבה יותר ב-4.0° (0.4 עד 6.3). הצפה אינה יכולה להקהות רכס שאינה מגיעה אליו; מישור חם מתחת לשפה יכול.

15 STUDY המחקר — מחקר 15

1 STEP הגדרת שאלת המחקר והבעיה

התופעה. המכתשים הגדולים על הבזלת של המגע מומסים, אף אחד אינו חד, ואף לא אחד נמצא על רצפת ים (מחקר 5). **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?

2 STEP סקירת ספרות (רקע מדעי)

מכתשים על הימות שהספרות מתארת כקבורים בחלקם בבזלת מאוחרת משמשים למדידת עובי הבזלת: ההצפה מגביהה את הקרקע שמחוץ למכתש, והשפה החשופה עומדת נמוך יותר מעליה [S25, S32]. Du ועמיתיו מצאו 262 שפות חשופות במלואן, 360 חשופות בחלקן ו-39 מוסתרות לגמרי, ועובי בזלת של 33–455 מ' סביב 41 מהן [S25]. **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.

3 STEP 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-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 [S16], 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.

STEP 5 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 E.6§.

STEP 6 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 הרכס ששורד קהה יותר בצד 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-Imbrium אינם מאבדים את שפתם יותר לעבר המישור מאשר לעבר היבשה (3%+); הרכס של Sinus Iridum עומד 1,721 מ' מעל הקרקע.

STEP 7 הסקת מסקנות וכתירת 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, וההקתה 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.

E.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 F — השפה

הבעיה

שפת המכתש מתעדת את הכוחות שפעלו ברגע הנחיתה. **הגישה:** השפות של 1,457 מכתשים נמדדו לאורך 72 כיוונים בארבעה קווי אורך, במכתשים בני אותו גודל, לאחר הסרת הימות ו-South Pole-Aitken.

חלקים C-E ספרו את המכתשים וקראו את מצבם על הימות. חלקים F-I קוראים עכשיו את צורתו של מכתש יחיד, חלק אחר חלק, ומשווים אותה בין ארבעה אזורים של הירח. העיקרון שמנחה את הקריאה הוא זה שנקבע ב-C.1§: מכתש הוא המקום שבו נחת חומר חוזר, וכל חלק שלו שומר רישום משלו. הרצפה מתעדת את הקרקע שעליה נחת החומר — את השכבות שמתחתיה ואת מה שמילא אותה מאוחר יותר (חלקים G ו-H). המרכז, שבו עומדת הפסגה המרכזית, מתעד את האנרגיה של הנחיתה (חלק ו). השפה מתעדת את הכוחות שפעלו על החומר שהועף למעלה ברגע הנחיתה (חלק זה). בקריאה משולבת, שלושתם מספרים באיזו עוצמה ירד החומר ועל איזה סוג של קרקע.

ארבעת האזורים. המכתשים נלקחו בארבע כיפות ברדיוס 30° , שמרכזיהן ב- 90° מערב, 180° , 90° מזרח ו- 0° . לפי המוסכמה המקובלת (A.1§), החצי של הירח שמרכזו ב- 90° מערב הוא החצי המוביל, הפונה קדימה בכיוון תנועת הירח, והחצי שמרכזו ב- 90° מזרח הוא החצי הנגרר; 180° הוא מרכז הצד הרחוק, ו- 0° הוא מרכז הצד הקרוב, הצד הפונה לכדור הארץ. במודל, המכתשים נוצרו בזמן שהגוף עדיין הסתובב עם כדור הארץ, והחומר שהגוף עצמו השליך החוצה ירד לעבר החצי המאסף שלו, שהוא הצפוף יותר במכתשים (C.3§); החצי המוביל פגש את החומר הזה חזיתית, כמו אדם שהולך לתוך גשם אלכסוני ונפגע בעוצמה הרבה ביותר בצד הפונה אליו. אם זה נכון, על החצי המוביל נחת החומר בעוצמה הרבה ביותר, והדבר חייב להיראות בצורת המכתשים שלו.

כיצד משווים שפות. שפה משורטטת כנקודה הגבוהה ביותר לאורך כל אחד מ-72 כיוונים מן המרכז (אחד בכל 5°), בין 0.85 ל-1.15 מן הרדיוס (A.2§). אפשר להשוות שני מכתשים רק אם הם בני אותו גודל, משום שלמכתש גדול צורה שונה מזו של מכתש קטן; לכן המכתשים משווים בתוך שלוש קבוצות גודל, 30–20, 50–30 ו-100–50 ק"מ, וכל גובה מחולק בקוטר D , כך שערך של $9.2 \times 10^{-3} D$ פירושו 9.2 אלפיות הקוטר — 230 מ' במכתש של 25 ק"מ. השפות אינן שמורות במידה שווה: החצי המוביל, הפונה לכיוון התנועה, הוא השחוק ביותר (A.2§). כדי ששפה שחוקה ומרוככת לא תיחשב בטעות לנחיתה חלשה, אי-הסדירות של השפה נקראת רק במחצית העמוקה של כל קבוצת גודל, המכתשים השמורים יותר.

F.1 השפה בארבעה קווי אורך

הטבלה נותנת, לכל אחד מארבעת האזורים, שלושה סימנים של נחיתה קשה על השפה. העמודה האחרונה, קריאה, מעמידה את החצי המוביל מול החצי המאסף: "W/E 1.25" פירושו שהערך של החצי המוביל גדול פי 1.25 מזה של החצי המאסף, והטווח שבסוגריים הוא תחום ה-95% שלו, שנמצא בכך שהמכתשים נדגמו מחדש באקראי פעמים רבות והיחס חושב מחדש בכל פעם (מחקר 6, שלב 6; N.2§). יחס שהתחום שלו אינו כולל את 1 אינו מוסבר במקרה. התאים הירוקים מסמנים את האזור שבו כל סימן חזק ביותר, והתאים הכתומים את החצי המאסף שאליו הוא מושווה.

מדד	90° מערב, מוביל	180° , רחוק	90° מזרח, נגרר	0° , קרוב	קריאה
-----	---------------------------	--------------------	-----------------------	------------------	-------

סימנים של נחיתה קשה על השפה					
W/E 1.25 (1.00– 7.1 1.48)	7.4	7.5	9.2	אי-סדירות השפה, לאחר הסרת ההרמוניות, מחצית עמוקה, 30–20 ק"מ ($\times 10^{-3} D$)	
W/E 1.14 (1.03– 3.4 1.39)	3.5	3.5	3.9	קפיצת השפה בין כיוונים, מחצית עמוקה, 30–20 ק"מ ($\times 10^{-3} D$)	
W גבוה יותר —	12%	—	17%	שפות מוארכות מאוד, $e > 1.2$, $D \geq 20$ ק"מ	

(1) השפה מעל היבשה ($\times 10^{-3} D$), כל המכתשים

8.1–) 4.5– W–E 15.2 (עד 0.1)	17.2	15.8	12.7	30–20 ק"מ	
5.6+ E–180° 13.6 (עד 8.1+)	13.1	18.7	14.4	50–30 ק"מ	
3.1+ E–180° 10.3 (עד 6.2+)	14.3	17.4	12.5	100–50 ק"מ	

שלושה סימנים של נחיתה קשה על השפה בארבעה קווי אורך, ובחלק התחתון — השפה מעל היבשה (F.1§).

שלוש השורות מודדות שלושה דברים שונים. אי-סדירות השפה היא המידה שבה גובה השפה משתנה לאורך המעגל, לאחר שהוסרו הגלים החלקים והרחבים שלה (ההרמוניות הנמוכות שלה, העלייה והירידה האיטיות שיש לכל שפה על קרקע לא אחידה); מה שנותר הוא השבירה בקנה המידה הקטן. קפיצת השפה היא המידה שבה הגובה משתנה מכיוון אחד לשכנו, במרחק 5° : שפה שבורה ומשוננת קופצת יותר. ההתארכות e היא היחס בין הרוחב הגדול ביותר של השפה לרוחב הקטן ביותר שלה; שפה עם $e > 1.2$ ארוכה ביותר מחמישית בכיוון אחד מאשר בכיוון האחר. החלק התחתון נותן את השפה מעל היבשה, גובה (1) של A.2§, לפי קבוצת גודל, על פני כל המכתשים: אפור מסמן את השפה הגבוהה ביותר בכל שורה וכחול את הנמוכה ביותר, ועמודת קריאה נותנת את ההפרש בין שני אזורים באלפיות הקוטר, עם תחום ה-95% שלו.

הסימנים של נחיתה קשה על השפה מצביעים על 90° מערב. במכתשים הקטנים השפות שלו הן הלא-סדירות יותר, לאורך המעגל ומכיוון אחד לשכנו, והשפות שלו מוארכות לעתים קרובות יותר. שפה משוננת היא שפה שנשברה בנחיתה; שפה מוארכת היא עקבה של חומר שהגיע באלכסון, כפי שמגיע חומר שקרקע נעה פוגשת חזיתית. ההבדלים בשפה מוגבלים למכתשים של 20–30 ק"מ, שבהם הנחיתות המאוחרות והקשות היו משפיעות ביותר; מעל 30 ק"מ האזורים אינם נבדלים. שלושת הסימנים מצביעים לאותו כיוון: השפות של החצי המוביל לא-סדירות ברבע יותר מאלה של החצי המאסף (9.2 מול 7.4), הן קופצות יותר בין כיוונים שכנים (3.9 מול 3.5, בתחום שכולו מעל 1), ו-17% מן השפות שלו מוארכות מאוד, מול 12%. הצד הרחוק והצד הקרוב, שבהם הקרקע לא נעה אל החומר הנופל וגם לא התרחקה ממנו, קרובים לחצי המאסף.

השפה עומדת הגבוה ביותר בצד הרחוק והנמוך ביותר בחצי המוביל. גובה רכס השפה מעל היבשה שסביב המכתש נמדד מחוץ לרצפה, והפסגה המרכזית אינה נכנסת אליו; הוא מושווה על פני כל המכתשים. מעל 30 ק"מ, השפות של הצד הרחוק עומדות גבוה בחמישית עד שתי חמישיות מאלה של החצי המאסף. במכתשים של 20–30 ק"מ, השפות של החצי המוביל הן הנמוכות ביותר, רבע מתחת לאלה של החצי המאסף; השפות של החצי המאסף עומדות הגבוה ביותר מבין הארבעה. למכתשים הגדולים ביותר של הצד הקרוב יש השפות הנמוכות מכולן (10 אלפיות הקוטר).

בין שני החצאים, השפה היא שנבדלת. מבין שלושת הגבהים, השפה מעל היבשה (1) היא זו שמבדילה בין החצי המוביל לחצי המאסף: במכתשים של 20–30 ק"מ, השפות של החצי המוביל עומדות נמוך ב-4.5 אלפיות הקוטר, והתחום אינו כולל אפס. הרצפה מתחת ליבשה (2) והשפה עד הרצפה (3) אינן מבדילות ביניהם: ההבדלים שלהן בין החצאים, בכל גודל, נמצאים בתוך התחומים שלהן (G.1§). לכך יש משמעות לקריאה. הבדל בעוצמת הנחיתה בין שני החצאים שינה את מה שהועף למעלה סביב המכתש, לא את העומק שאליו הגיע המכתש; העומק, כפי שחלק G מראה, נקבע על ידי הקרקע שמתחת, ושני החצאים עומדים על קרקע מאותו סוג.

כיצד המודל קורא את השפות. המכתשים נוצרו בזמן שהגוף עדיין הסתובב עם כדור הארץ, ואותו סיבוב שמייך את הנחיתות פעל גם על החומר שהועף למעלה בכל נחיתה. בצד הרחוק, הפונה הרחק מכדור הארץ, הכוח הצנטריפוגלי של הסיבוב המשותף הרים את החומר שהועף החוצה, והשפות עומדות גבוה. בחצי המוביל, החומר ירד עם הכבידה ועם התנועה קדימה של הקרקע שפגשה אותו, והשפה נלחצה מטה. בחצי המאסף, הנחיתה הייתה רגילה, והקרקע שהתרחקה מן החומר הנופל משכה את הרצפה מעט איתה, כך שהשפה עומדת מעט גבוה יותר מאשר בחצי המוביל. הצד הקרוב, הפונה לכדור הארץ, נלחץ על ידי אותו כוח צנטריפוגלי אל הקרקע שלו עצמו, והשפות שלו נדחסו.

התמונה היא של גוף שמסתובב סביב מרכז משותף עם כדור הארץ, כשהצד הקרוב הוא הפנימי והצד הרחוק הוא החיצוני. בצד החיצוני, הרחוק, הדחיפה כלפי חוץ של הסיבוב פעלה נגד הכבידה של הגוף עצמו ואפשרה לחומר שהועף למעלה לעלות ולהישאר גבוה, כמו מים הניתזים מן השפה החיצונית של גלגל מסתובב; בצד הפנימי, הקרוב, אותה דחיפה הופנתה אל תוך הקרקע ולחצה את החומר שהועף למעלה מטה. ארבע השפות נותנות אפוא ארבעה כוחות ברגע הנחיתה: משיכה כלפי חוץ בצד הרחוק, מפגש חזיתי בחצי המוביל, נחיתה רגילה בחצי המאסף ולחיצה בצד הקרוב (P.1§). מה שיש בידינו עכשיו: השפה מתעדת את הכוחות ברגע הנחיתה; היא מסמנת את החצי המוביל כזה שעליו הייתה הנחיתה הקשה ביותר, ואת הצד הרחוק כזה שבו החומר שהועף למעלה הורם.

המחקר. השפה, הרצפה, החספוס והפסגה הם מחקר אחד, מחקר 6, המוצג שלב אחר שלב ב-I.1§.

חלק G – תחתית המכתש מתחת לקרקע

הבעיה

המידה שבה מכתש מגיע אל מתחת ליבשה שסביבו מתעדת את הקרקע שעליה נחת. **הגישה:** הרצפה מתחת ליבשה והשפה עד הרצפה נמדדו כשהפסגה המרכזית מוסתרת.

חלק F קרא את החלק העליון של המכתש, את השפה שלו. חלק זה קורא את תחתיתו. השאלה שהוא עונה עליה היא החלק השני של העיקרון של C.1§: מה שנמצא מתחת למכתש הוא השכבות שעליהן נחת. אם הקרקע הייתה שונה מצד אחד של הירח לצד האחר, הרצפות חייבות להימצא בעומקים שונים מתחת ליבשה שסביבן, תהא עוצמת הנחיתה אשר תהא. לחלק שלושה שלבים: הרצפה בארבעת קווי האורך (G.1§); הרצפות של המכתשים הגדולים על הבזלת של הצד הקרוב, שחלקן עומדות גבוה מן הבזלת שסביבן (G.2§); והברזל ברצפות הגבוהות האלה ובנמוכות (G.3§).

6.1 הרצפה מתחת ליבשה

הטבלה נותנת שניים משלושת הגבהים של A.2§ בכל אחד מארבעת קווי האורך ובכל אחת משלוש קבוצות הגודל. גובה (2) הוא המרחק שבו הרצפה נמצאת מתחת ליבשה שסביב המכתש; גובה (3) הוא המרחק שבו היא נמצאת מתחת לשפה שלה עצמה, והוא הסכום של השפה מעל היבשה (1) ושל הרצפה מתחת ליבשה (2). עמודת קריאה נותנת את ההבדל בין שני אזורים באלפיות הקוטר, עם תחום ה-95% שלו: 16+ E-180° (11+ עד 22+) פירושו שהרצפות של הצד הרחוק עמוקות ב-16 אלפיות יותר מאלה של החצי המאסף, ושההבדל נמצא בין 11 ל-22 אלפיות; "N" הוא הצד הקרוב ו-"W" החצי המוביל. אפור מסמן את האזור העמוק ביותר בכל שורה, וכחול את הרדוד ביותר במקום שבו הוא בולט.

ממד	90° מערב, מוביל	180°, רחוק	90° מזרח, נגרר	0°, קרוב	קריאה
(2) הרצפה מתחת ליבשה ($\times 10^{-3} D$), הפסגה המרכזית מוסתרת					
30–20 ק"מ	41	54	38	27	16+ E-180° ; (11+ עד 22+) 11– N-E (עד 5–)
50–30 ק"מ	24	47	29	25	18+ E-180° ; (12+ עד 26+) 12– W-E (עד 1+)
100–50 ק"מ	22	36	27	17	4+ 9+ E-180° W-E ; (עד 16+) 5– (10– עד 1+)
(3) השפה עד הרצפה, = (1) + (2) ($\times 10^{-3} D$), הפסגה המרכזית מוסתרת					

18+ E-180° ;(26+ עד 10+) 10-) 1- W-E (עד 8+)	38	51	69	50	30-20 ק"מ
22+ E-180° ;(33+ עד 16+) 5- W-E (11- עד (1+	38	42	64	37	50-30 ק"מ
5+) 11+ E-180° N-E ;(22+ עד (4- עד 26-) 16-	26	42	53	36	100-50 ק"מ

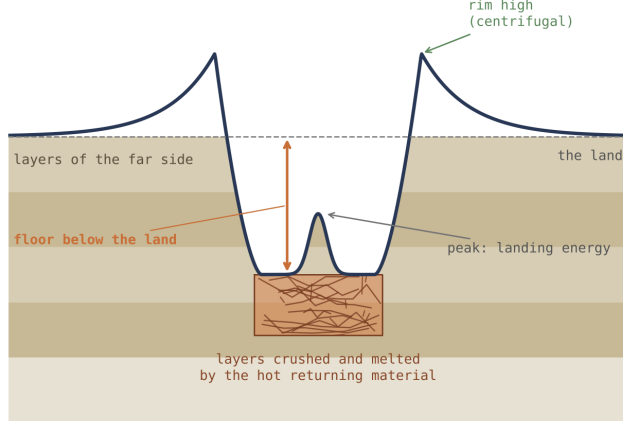
הרצפה מתחת ליבשה והשפה עד הרצפה בארבעה קווי אורך ובשלוש קבוצות גודל (G.1§).

קראו קודם את העמודה האפורה: בכל שש השורות הצד הרחוק הוא העמוק ביותר, וכל תחום של הצד הרחוק נמצא כולו מעל אפס. אחר כך את התאים הכחולים: הצד הקרוב הוא הרדוד ביותר, והרצפות שלו במכתשים הקטנים ביותר נמצאות 27 אלפיות מתחת ליבשה, מול 54 בצד הרחוק. החצי המוביל והחצי המאסף עומדים קרוב זה לזה, והתחומים של ההבדלים ביניהם (12- עד 1+, 10- עד 1+, 10- עד 8+, 11- עד 1+) כולם כוללים אפס.

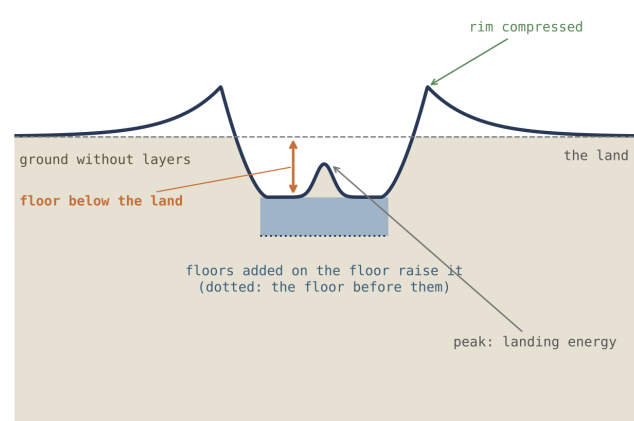
הרצפה נמצאת הנמוך ביותר בצד הרחוק והגבוה ביותר בצד הקרוב. בכל גודל, הרצפות של הצד הרחוק נמצאות העמוק ביותר מתחת ליבשה שסביבן, ב-9 עד 18 אלפיות הקוטר יותר מאלה של החצי המאסף; הרצפות של הצד הקרוב נמצאות הגבוה ביותר, בכמחצית העומק של הצד הרחוק; והרצפות של החצי המוביל והחצי המאסף דומות בתוך התחומים שלהן. השפה עד הרצפה (3) הולכת אחר שני המרכיבים: המכתשים של הצד הרחוק הם העמוקים ביותר, הרצפה שלהם נמוכה, ומעל 30 ק"מ השפה שלהם גבוהה, ב-11 עד 22 אלפיות יותר מאלה של החצי המאסף; המכתשים של הצד הקרוב הם הרדודים ביותר, הרצפה גבוהה והשפה נמוכה. הרצפות של הצד הקרוב נמצאות הגבוה ביותר משתי סיבות. שם החומר החוזר לא נחת על שכבות שאפשר היה למעוך תחתיו; וכל שכבה או רצפה שנוספו אחר כך, ובהן אלה של הימות, הגבירו את הרצפה ביחס ליבשה שסביבה, כפי שמראה המישוריות של הרצפות האלה. הצד הרחוק בנוי שכבות — הסיאל של גוף האם וחומר חוזר שהונחו שכבה על שכבה (מאמר 3, B.7§). חומר חם שנחת עליהן מלמעלה מעך את השכבות שמתחת למכתש והמיס אותן, והרצפה שקעה לתוכן; לכן הרצפות של הצד הרחוק נמצאות הנמוך ביותר. בין החצי המוביל לחצי המאסף, הנחיתה שינתה את שפת המכתש, לא את מפלס הרצפה שלו.

התמונה היא ההבדל בין לחיצת מוגהץ חם על ערימה של גליונות מונחים ברפיון לבין לחיצתו על קרש: הערימה נכנעת תחתיו והמגהץ שוקע; הקרש מחזיק, וכל מה שנמרח עליו מאוחר יותר רק מגביה את פני השטח. הצד הרחוק הוא הערימה, הצד הקרוב הוא הקרש. מומחה יטען שמכתש עמוק יותר הוא לעתים קרובות מכתש עתיק יותר שהתמלא פחות, או צעיר יותר שנשחק פחות. ההשוואה עונה על כך במקום שבו היא יכולה: החצי המוביל והחצי המאסף נבדלים בשחיקה (43% מול 50% מן השפות שלהם במחצית השמורה יותר, A.2§), ובכל זאת הרצפות שלהם אינן נבדלות כלל, כך ששחיקה לבדה אינה מזיזה את הרצפה בשיעורים שבטבלה. הצורה לבדה אינה מפרידה לגמרי בין גיל לנחיתה, והדבר נאמר בין המגבלות של מחקר 6 (I.1§).

Far side: the floor sank into its layers



Near side: no layers to crush, the floor stays high



איור 6. המכתש מתחת לקרקע, בשני הצדדים (G.1–I.1§). משמאל, הצד הרחוק: החומר החוזר החם נחת על השכבות של הצד הרחוק, מעך אותן והמיס אותן, והרצפה שקעה עמוק מתחת ליבשה; השפה עומדת גבוה. מימין, הצד הקרוב: לא היו שכבות למעוך, הרצפה נשארת קרוב ליבשה, והרצפות שנוספו עליה מגביהות אותה עוד; השפה דחוסה. בשניהם הפסגה המרכזית נקבעת על ידי האנרגיה של הנחיתה. סכמטי.

איור 6 מעמיד את שני הצדדים זה לצד זה ומראה את שלושת הרישומים של מכתש בתמונה אחת: הרצפה, שנקבעת על ידי הקרקע שמתחת; השפה, על ידי הכוחות ברגע הנחיתה; הפסגה, על ידי האנרגיה של הנחיתה.

מאחורי הקלעים. הרצפה נמדדה תחילה על פני כל מרכז המכתש, כולל הפסגה המרכזית. לחצי המוביל יש הכי הרבה פסגות מרכזיות, ופסגה במרכז מגביהה את החציון של הרצפה. לכן כל רצפה נמדדה מחדש כשהפסגה מוסתרת: טביעת הרגל של הפסגה שורטטה על מודל הגבהים והוסרה, והרצפה נקראה על מה שנותר, פעם אחת עד 0.4 מן הרדיוס ופעם אחת בטבעת שבין 0.2 ל-0.5 ממנו; השתיים מסכימות. הערכים שלמעלה הם של הראשונה.

6.2 הרצפות של המכתשים הגדולים על הבזלת

G.1§ השווה את הרמות של ארבעת קווי האורך, לאחר הסרת הימות. סעיף זה פונה אל המכתשים שנחתו על הבזלת הכהה של הצד הקרוב עצמה, הקרקע שהייתה חמה ורכה כשהם נחתו. שני סוגים של בזלת מופרדים כאן, כמו ב-D.2§: רצפות הימות, הבזלת שבתוך ליבת כיפת ההזנה שמתחת לכל אחד מן הפתחים של מאמר 5, והמישורים, בזלת מחוץ לכל ים — קרום רגיל שהותך במקומו בזמן שהגוף היה מחובר, ללא כיפת הזנה מתחתיו. המכתשים ממיינים לפי מצבם כמו ב-D.2§: מומס (רדוד יותר מ-95% ממכתשי הרמות בגודלו, ונראה כטבעת), מרוח (רדוד יותר מ-75% מהם) וחד (נוצר לאחר שהקרקע קפאה).

מכתש של הרמות שומר על העומק של מכתש: הרצפה שלו נמצאת כ-1.6 ק"מ מתחת ליבשה שסביבו. מכתש גדול על הבזלת של הצד הקרוב — לא. הרצפה שלו עומדת במפלס של הבזלת שמחוצה לו, וכשליש מן הגדולים עומדים גבוה ממנה. מבין 86 המכתשים של 40 ק"מ ויותר שיש סביבם בזלת ממופה, 84 נמצאים על המישורים — הקרום שהותך במקומו — ושניים על רצפות הימות של מאמר 5; על רצפות הימות המכתשים הגדולים נעלמו לתוך הים הפעיל (D.2§), ומה שנמדד כאן הוא המישורים, קרקע חמה מאותו סוג.

הטבלה ממיינת את 86 המכתשים הגדולים שעל הבזלת לפי מצבם ומעמידה אותם מול 411 מכתשי רמות באותם גדלים. לכל מכתש, הרצפה מושווית לבזלת בטבעת שממש מחוצה לו, ונספרת מעל אם היא עומדת גבוה ביותר מ-50 מ', במפלס שלה אם היא בטווח 50 מ', ומתחתיה אם היא נמוכה ביותר מ-50 מ'. קראו את העמודה האחרונה מלמעלה למטה: הרצפות עוברות מכמה עשרות מטרים מתחת לבזלת (מומסים, כתום) ליותר מקילומטר מתחתיה (חדים, כחול) ועד העומק המלא של מכתש רמות (אפור).

מכתשים של 40 ק"מ ויותר	מכתשים	מעל הבזלת שבחוץ	במפלס שלה (\$50 מ')	מתחתיה	חציון
מומסים, על הבזלת	52	15	12	25	מ' -46
מרוחים, על הבזלת	24	9	2	13	מ' -107
חדים, על הבזלת	10	1	0	9	מ' -1,388
מכתשי רמות, אותם גדלים	411	12	9	390	מ' -1,575

רצפות המכתשים הגדולים על הבזלת מול הבזלת שמחוצה להן, ומול מכתשי רמות באותם גדלים (G.2§).

המכתשים החדים מתנהגים כמעט כמו מכתשי רמות: הרצפות שלהם נמצאות 1,388 מ' מתחת לבזלת, קרוב ל-1,575 מ' של הרמות, משום שהם נחתו לאחר שהקרקע קפאה. המכתשים המומסים והמרוחים, שנחתו כשהיא עדיין הייתה רכה, הם בעלי רצפות בטווח של כמאה מטרים מן הבזלת, ורבים מהם מעליה.

מה בולט. לעשרים וארבעה מתוך 76 המכתשים המומסים והמרוחים של 40 ק"מ ויותר יש רצפה העומדת יותר מ-50 מ' מעל הבזלת שמחוצה להם, וחלקם בחצי קילומטר: Plato עומד 500 מ' מעל הבזלת של Imbrium, ומכתש של 182 ק"מ Oceanus Procellarum עומד 518 מ' מעל המישור שסביבו. הדבר קורה בתוך המגע ומעבר לו באותה מידה. (המגע הוא האזור של הצד הקרוב שנגע אחרון בקצה האגס של כדור הארץ, מאמר 3.) בין מכתשי הרמות רק ל-12 מתוך 411, בערך אחד משלושים וארבעה, יש רצפה מעל היבשה שסביבם; בין המכתשים המומסים והמרוחים שעל הבזלת — בערך לאחד משלושה.

מדוע זה חשוב. אילו הבזלת שבחוץ הייתה ממלאת את המכתש — מעל השפה שלו או דרך פרצה בה — הרצפה הייתה עומדת במפלס של אותה בזלת, כפי שמים עומדים במפלס אחד בשני כלים שלובים, או מתחתיו. רצפה העומדת מעל הבזלת שבחוץ אינה יכולה להיות שהתמלאה ממנה. היא התמלאה מבפנים, במפלס משלה.

כיצד המודל קורא זאת. הנחיתה של גוף גדול על קרקע שעדיין הייתה נוזלית או רכה — מישור שהותך בחום של כדור הארץ, או ים — הגביהה את מפלס הרצפה שמתחתיו, גבוה יותר ממה שהוא עומד היום. הרצפה המוגבהת שקעה אחר כך בחזרה לעבר מפלס הקרקע שסביבה; אבל השקיעה בחזרה לוקחת זמן, והקרקע התקררה בזמן שזה קרה. במקום שבו ההתקררות ניצחה, הרצפה קפאה כשהיא עדיין עומדת גבוה: כשליש מן המכתשים הגדולים. במקום שבו לרצפה היה זמן, היא התייצבה במפלס הקרקע או מעט מתחתיו, כפי שקרה ברוב המכתשים המומסים. מכתש של הרמות נחת על קרקע מוצקה; דבר לא הגביה את הרצפה שלו, והוא שמר על העומק של מכתש. שני דברים נוספים נכנסים: הצמיגות והטמפרטורה של הקרקע, שקבעו כמה מהר שקעה הרצפה בחזרה ומתי קפאה; והכבידה. בצד הקרוב, חומר שהגיע מכדור הארץ נמשך אל פני השטח על ידי הכבידה של הירח, בעוד המשיכה של כדור הארץ פעלה בכיוון ההפוך; השתיים קיזזו זו את זו בחלקן, הנחיתות היו רכות, ורצפות מוגבהות רבות קפאו לפני שחזרו. על הצד הרחוק נחת חומר בזמן שהגוף היה מחובר, תחת המשיכה המשולבת של הירח ושל כדור הארץ: הנחיתות היו קשות יותר, והמכתשים שלו, על הימות ועל הרמות כאחד, הם העמוקים יותר.

התמונה היומיומית היא גוש שנזרק לתוך סיר של דייסה מסמיכה: פני השטח במקום שבו נפל מתרוממים תחילה ואחר כך שוקעים לאט בחזרה, ואם הסיר מתקרר מהר מספיק, ההתרוממות נשארת עומדת. צמיגות, שבה נעשה כאן שימוש, היא ההתנגדות של חומר לזרימה — למים יש מעט ממנה, לדבש קר הרבה; ככל שהקרקע צמיגה וקרה יותר, הרצפה שקעה בחזרה לאט יותר, ויותר מן ההתרוממות נשמר.

מה מוסיפה הכבידה שמתחת. המסה שמתחת למכתשים מצביעה לאותו כיוון (D.3§, מחקר 14). מתחת למכתש של הרמות, בסיס הקרום עומד נמוך יותר מאשר סביבו, בחציון של 0.41 ק"מ: הנחיתה שברה את הקרקע שמתחתיו לחומר קל ורופף, והמכתש יושב מעל חוסר במסה. מתחת למכתשים המומסים של המישורים אין לא חוסר ולא עודף (+0.08 ק"מ): הקרקע הייתה רכה כשהם נחתו, ושום עדשה של חומר שבור לא נותרה מתחתם. מתחת למכתשים המומסים שעל רצפות הימות יש עודף: בסיס הקרום עומד גבוה ב-3.0+ ק"מ, מול 1.4+ מתחת לנקודות אקראיות על אותן רצפות, כך שהמכתשים נושאים +0.8 ק"מ יותר מן הרצפה שלהם עצמם, ב-13 מתוך 16. העודף הזה רחב ואין לו קצה: התלילות של הכבידה בקצה המכתש היא 1.04 מול 1.00 על הרצפה שמסביב. גוף של בזלת שממלא את המכתש מבחוץ היה שוקל עם הקצה החד של המכתש; חומר ששקע לתוך ים פעיל והתפשט בו — לא. לכן המכתשים שעל הקרקע הרכה של הצד הקרוב חסרים, בכבידה שלהם כמו ברצפות שלהם, את הסימן של מכתש רגיל על קרקע מוצקה.

מה שיש בידינו עכשיו: רצפת מכתש נמצאת במקום שבו הקרקע שלה אפשרה לה להימצא — עמוק בשכבות המעוכות של הצד הרחוק, קרוב לפני השטח בצד הקרוב, ועל הבזלת הרכה במפלס הקרקע או מעליו, במקום שבו התרוממות קפאה לפני שהספיקה לשקוע.

STUDY 10 מחקר 10

שלב 1 · הגדרת שאלת המחקר והבעיה. התופעה. מכתשים גדולים על הבזלת של הצד הקרוב רדודים: הרצפות שלהם ממולאות כמעט עד מפלס הבזלת (מחקר 5). **הפער בידע.** היכן בדיוק עומדות הרצפות האלה מול הבזלת שמחוצה להן — מתחתיה, במפלס שלה או מעליה — לא נמדד מכתש אחר מכתש, והתשובה מבדילה בין שתי קריאות: רצפה שהתמלאה מן הבזלת שבחוץ אינה יכולה לעמוד מעליה. **שאלת המחקר:** באיזה מפלס עומדות הרצפות של המכתשים הגדולים המומסים והמרוחים על הבזלת של הצד הקרוב, מול הבזלת שממש מחוצה להן, ומול הרצפות של מכתשי רמות באותו גודל?

שלב 2 · סקירת ספרות (רקע מדעי). בספרות, הרצפות של מכתשים על הימות מולאו על ידי אותן זרימות בזלת שיצרו את הימות [S20, S25]; רצפות המוגבהות מעל סביבתן מוכרות במכתשים בעלי רצפה סדוקה (floor-fractured craters), שבהם מאגמה שעלתה מתחת למכתש התפשטה כאדן (sill) והרימה את הרצפה מלמטה [S9]. (אדן/ הוא יריעה שטוחה של חומר מותך שנדחת לצדדים בין שכבות, וכשהיא מתנפחת היא מרימה את מה שמעליה.) **מה חדש כאן:** כל מכתש מומס ומרוח על הבזלת של הצד הקרוב נמדד מול הבזלת בטבעת שממש מחוצה לו, כשרצפות הימות והמישורים מופרדים, ומכתשי רמות באותו גודל משמשים ביקורת.

שלב 3 · ניסוח השערת המחקר. נחיתה גדולה על קרקע נוזלית או רכה הגביהה את הרצפה שמתחתיה; הרצפה שקעה בחזרה לאט בזמן שהקרקע התקררה, וחלק מן הרצפות קפאו לפני שחזרו. מכאן: (א) הרצפות של המכתשים הגדולים המומסים והמרוחים עומדות קרוב למפלס הבזלת שבחוץ, הרבה מעל העומק של מכתש רמות; (ב) חלק ניכר מהן עומד מעליה; (ג) בצד הרחוק, שעליו נחת חומר תחת המשיכה המשולבת, המכתשים שעל הימות עמוקים יותר מאשר בצד הקרוב.

שלב 4 · מערך המחקר (מתודולוגיה). סוג המחקר: כמותי; גבהים מושווים מכתש אחר מכתש. **המדגם:** המכתשים המומסים, המרוחים והחדים של 40 ק"מ ויותר על הבזלת של הצד הקרוב, שיש להם בזלת ממופה בטבעת שמחוצה להם (86 מכתשים: 84 על המישורים, 2 על רצפות הימות); הביקורת: 411 מכתשי רמות באותם גדלים, מחוץ לימות ול-SPA. **הכלים:** מודל הגבהים של LOLA ברזולוציה של 118 מ', מפת הימות של LROC, כיפות ההזנה של מאמר 5, וקוד שקורא את הרצפה (עד 0.6 מן הרדיוס) ואת הים בטבעת שבין 1.6 ל-2.4 רדיוסים, פיקסלים של ים בלבד. LOLA הוא מד-הגובה הלייזרי של Lunar Reconnaissance Orbiter, המודד את הזמן שלוקח לפעימת לייזר לרדת אל פני השטח ולחזור; LROC הוא המצלמה של אותה חללית, שמן התמונות שלה ממופה קו המתאר של הבזלת. הטבעת שבין 1.6 ל-2.4 רדיוסים נמצאת מחוץ לשפה ולחומר המושלך הקרוב אליה ביותר, כך שהיא קוראת את הבזלת עצמה.

מדד	מה הוא אומר, במילים פשוטות
הרצפה פחות הבזלת שבחוץ	כמה גבוה עומדת הרצפה מעל הבזלת שממש מחוץ למכתש (או מתחתיה)
מעל, במפלס, מתחת	מעל: גבוה ביותר מ-50 מ'; במפלס: בטווח 50 מ'; מתחת: נמוך ביותר מ-50 מ'
הביקורת	מה עושה הרצפה של מכתש רגיל בגודל זה: היא נמצאת עמוק מתחת ליבשה שלה

המדדים של מחקר 10.

שלב 5 • איסוף הנתונים (ביצוע המחקר). המדידות נעשו על הסיווגים שנקבעו קודם (E.2§), בלי לשנות אותם; כל מכתש נשמר בקובץ, ואלה שהיה להם מעט מדי ים ממופה בטבעת החיצונית הופרדו.

שלב 6 • ניתוח הנתונים ועיבודם. מול הביקורת. הרצפה החיצונית של המכתשים הגדולים המומסים נמצאת 46 מ' מתחת לבזלת שבחוץ, של המרוחים 107 מ'; של מכתשי הרמות 1,575 מ' מתחת ליבשה שלהם. מעל הבזלת. 15 מתוך 52 המומסים ו-9 מתוך 24 המרוחים עומדים יותר מ-50 מ' מעליה; מבין מכתשי הרמות, 12 מתוך 411. לפי גודל. בין כל המכתשים המומסים והמרוחים, החלק העומד יותר מ-50 מ' מעל הבזלת עולה עם הגודל: 5% ב-5–10 ק"מ, 8% ב-10–20, 20% ב-20–40, 28% ב-40–80 ו-41% ב-80 ק"מ ויותר (מבחן למגמה עקבית נותן הסתברות מקרית של פחות מאחד למיליון מיליון). כשמודדים ביחס לגודל המכתש, יותר מחמש אלפיות הקוטר מעל, החלק הוא 5–11% בכל גודל ואינו גדל. לפי אזור. בתוך המגע 11 מתוך 39 מכתשים גדולים עומדים מעל הבזלת, מעבר לו 13 מתוך 37: אין הבדל. ימות ומישורים. 84 מתוך 86 נמצאים על המישורים; מבין השניים שעל רצפות הימות, אחד עומד מעל. הצד הרחוק. על רצפות הימות של הצד הרחוק המכתשים עמוקים יותר מאשר בצד הקרוב מ-20 ק"מ ומעלה: עומק לקוטר 0.026 מול 0.021 ב-20–40 ק"מ, 0.028 מול 0.020 ב-40–80 ק"מ ו-0.021 מול 0.010 ב-80 ק"מ ויותר (הסתברויות מקריות 0.016, 0.02 ו-0.002); ופחות מהם מומסים, 38% מול 50%. גם מכתשי הרמות של הצד הרחוק עמוקים יותר מאלה של הצד הקרוב, שכן המשיכה המשולבת פעלה על שניהם.

שני המדדים של הגודל אומרים דברים שונים, ושניהם נשמרים. סף קבוע של 50 מ' הוא חלק גדול יותר מעומקו של מכתש קטן מאשר מעומקו של מכתש גדול, ולכן היה צפוי שהחלק העומד מעליו יגדל עם הגודל גם אילו כל מכתש היה מוגבה באותו שיעור מן הקוטר שלו; כשמודדים ביחס לקוטר, החלק הזה בכל גודל. "הסתברות מקרית" היא הסיכוי שהבדל גדול כמו זה שנמצא היה נוצר אילו שתי הקבוצות היו באמת דומות; ככל שהיא קטנה יותר, כך פחות אפשר לייחס את ההבדל למקרה.

שלב 7 • הסקת מסקנות וכתיבת הדוח. תוצאה. שלושת החלקים נתמכים: הרצפות של המכתשים הגדולים על הבזלת עומדות במפלס שלה, לא בעומק של מכתש; שליש מהן עומדות מעליה; והמכתשים של הצד הרחוק על הבזלת הם העמוקים יותר. רצפה שמעל הבזלת שבחוץ לא התמלאה ממנה. המכתשים שנמדדו נמצאים על המישורים; על רצפות הימות המכתשים הגדולים נעלמו. **מגבלות.** הבזלת שבחוץ נקראת כחציון של טבעת; במקום שבו הים משופע, כמו לעבר מרכזו של אגן, צד אחד יכול להיראות גבוה, ושום הטיה לא תוקנה; העלייה של החלק עם הגודל מתקיימת במטרים אך לא ביחס למכתש, כך שעדיין לא הוכח שנחיתה גדולה יותר מגביהה את הרצפה יותר; רצפה מוגבהת לבדה אינה מבחינה בין התרוממות שקפאה לבין חדירה מתחתיה. **כיווני מחקר נוספים.** ייחוס לבזלת שבחוץ המתקן להטיה שלה; צורת הרצפות המוגבהות, האם הן גבוהות יותר במרכז, כפי שהתרוממות קפואה הייתה, או שטוחות; ואותו מדד על הימות של הצד הרחוק.

6.3 ברזל ברצפות הגבוהות ובנמוכות

G.2§ מצא שחלק מן הרצפות שעל הבזלת קפאו גבוה ואחרות התייצבו נמוך. אם הרצפות מוינו כשהן עדיין נוזליות, הגבוהות והנמוכות צריכות להיבדל לא רק במפלס אלא גם במה שהן עשויות ממנו. סעיף זה קורא את הברזל והטיטניום שלהן. FeO (תחמוצת ברזל) ו-TiO₂ (תחמוצת טיטניום) ניתנים באחוזי משקל (%wt), אחוזים ממשקל החומר שעל פני השטח; שניהם כבדים, ושניהם נקראים ממסלול לפי האופן שבו פני השטח מחזירים אור בכמה אורכי גל.

הרצפות המוגבהות של G.2§ עניות יותר בברזל מן הרצפות הנמוכות; כמעט כולן נמצאות על המישורים. רצפה מוגבהת קפאה בזמן שההתרוממות של הנחיתה עדיין החזיקה אותה למעלה; היא הייתה עשירה בחומרים נדיפים, והחומרים הנדיפים נשאו את החומר הקל למעלה איתם. הרצפות ששקעו בחזרה אל מפלס הקרקע או מתחתיו התייצבו עם החומר הכבד יותר, הברזל והטיטניום. חומרים נדיפים הם החומרים שהופכים בקלות לגז — מים מעל לכול; כשהם עולים כבועות, הם נושאים את החלק הקל יותר של התכה כלפי מעלה, כפי שהבועות בסיר רותח נושאות את הקצף אל הראש.

הטבלה ממיינת את המכתשים המומסים והמרוחים של 20 ק"מ ויותר — מדגם רחב יותר מן ה-40 ק"מ של G.2§, כדי שהקבוצות יהיו גדולות דיין להשוואה — לפי גובה הרצפה שלהם מול הבזלת שבחוץ, לפי אותו כלל של 50 מ'. כחול מסמן את הרצפות הגבוהות, כתום את אלה שבמפלס ואת הנמוכות; הערכים המודגשים הם שתי הקבוצות שההשערה משווה.

מכתשים מומסים ומרוחים של 20 ק"מ ויותר	מכתשים	FeO של הרצפה (%wt)	TiO ₂ (%wt)
רצפה מעל הבזלת שבחוץ (<50 מ')	51	13.3	1.5
רצפה במפלס הבזלת (\$50 מ')	71	15.7	2.9
רצפה מתחת לבזלת שבחוץ (<50 מ')	86	14.4	2.5

ברזל וטיטניום ברצפות, לפי גובה הרצפה מול הבזלת שבחוץ (G.3§).

הרצפות הגבוהות נושאות הכי מעט ברזל והכי מעט טיטניום מבין שלוש הקבוצות: 13.3 wt% FeO מול 14.4 ברצפות הנמוכות, ו-1.5 wt% TiO₂ מול 2.5 — טיטניום נמוך בכשתי חמישיות. הרצפות שבמפלס הבזלת הן העשירות מבין השלוש; המחקר שלהן מפרט מה הדבר מכריע ומה לא.

11 STUDY מחקר 11

שלב 1 • הגדרת שאלת המחקר והבעיה. התופעה. לכשליש מן המכתשים הגדולים על הבזלת יש רצפות העומדות מעל הבזלת שמחוצה להם, והשאר נמצאים במפלס שלה או מתחתיה (מחקר 10). **הפער בידע.** האם רצפה שקפאה גבוה נבדלת בהרכב הכימי שלה מרצפה שהתייצבה נמוך — לא נמדד. **שאלת המחקר:** האם הרצפות הנמצאות מתחת לבזלת שבחוץ נושאות יותר ברזל וטיטניום מן הרצפות העומדות מעליה?

שלב 2 • סקירת ספרות (רקע מדעי). ברזל וטיטניום נקראים מן ה-Multiband Imager של Kaguya [S10]. בספרות, רצפת מכתש על ים נושאת את הבזלת שהציפה אותה, והברזל שלה הוא זה של הזרימה; רצפה שהוגבהה על ידי חדירה מתחתיה נושאת מילוי משלה [S9]. **מה חדש כאן:** הרצפות ממוינות לפי הגובה שלהן מול הים שממש מחוצה להן, והברזל והטיטניום שלהן מושווים.

שלב 3 · ניסוח השערת המחקר. רצפה מוגבהת קפאה בזמן שהוחזקה למעלה, עשירה בחומרים נדיפים שנשארו איתם את החומר הקל; רצפה ששקעה בחזרה התייצבה עם החומר הכבד יותר. לכן הרצפות הנמוכות נושאות יותר ברזל וטיטניום מן הרצפות הגבוהות.

שלב 4 · מערך המחקר (מתודולוגיה). סוג המחקר: כמותי; השוואת קבוצות. המדגם: המכתשים המומסים והמרוחים של 20 ק"מ ויותר על הבזלת של הצד הקרוב, שיש סביבם בזלת ממופה (208 מכתשים; 195 על המישורים ו-13 על רצפות הימות). הכלים: גובהי הרצפות של מחקר 10, והברזל והטיטניום של Kaguya בכל רצפה (עד 0.7 מן הרדיוס) ובבזלת שבחוץ, ב-128 פיקסלים למעלה. בדגימה זו פיקסל משתרע על מעט יותר מ-200 מ' על פני הירח.

שלב 5 · איסוף הנתונים (ביצוע המחקר). כל רצפה שובצה בקבוצה שלה לפי הגובה שלה מול הבזלת שבחוץ, לפי הכלל של מחקר 10, לפני שההרכב הכימי של הקבוצות הושווה.

שלב 6 · ניתוח הנתונים ועיבודם. הקבוצות. הרצפות הנמוכות נושאות 14.4 wt% FeO ו-2.5 wt% TiO_2 , הרצפות הגבוהות 13.3 ו-1.5. מבחן שבודק אם שתי קבוצות נבדלות (מבחן Mann–Whitney), המשווה את הדירוגים שלהן) נותן הסתברות מקרית של 0.018 לברזל ו-0.010 לטיטניום. בתוך יחידת בזלת אחת. בשבע יחידות שיש בהן גם רצפה גבוהה וגם רצפה נמוכה ביותר מ-200 מ', הרצפה הנמוכה עשירה יותר בברזל בחמש, בחציון של 0.9 wt%. רגישות. כשמגדירים כנמוכות רק את הרצפות הנמצאות יותר מ-100, 200 או 300 מ' מתחת לבזלת, הרצפות הנמוכות נשארות העשירות יותר (13.7, 14.3 ו-14.5 מול 13.3 wt%), אבל עם פחות מכתשים ההבדל כבר אינו מעבר למקרה (הסתברויות 0.15, 0.21 ו-0.33). העשירות ביותר. הרצפות שבמפלס הבזלת הן העשירות מכולן, 15.7 wt%. המישורים בלבד. על המישורים הרצפות הנמוכות נושאות 14.4 wt% FeO ו-2.5 wt% TiO_2 , הגבוהות 13.4 ו-1.5 (הסתברויות 0.04 ו-0.01); על רצפות הימות יש שלוש גבוהות ושלוש נמוכות, מעט מדי להשוואה.

ההשוואה בתוך יחידת בזלת אחת חשובה משום שהבזלת של הצד הקרוב אינה זהה בכל מקום: יש יחידות עשירות יותר בברזל מאחרות. השוואה בין רצפה גבוהה לרצפה נמוכה הנמצאות באותה יחידה מסירה את ההבדל הזה, והכיוון נשמר גם שם. מבחן הרגישות שואל אם התוצאה תלויה במקום שבו משורטט הקו בין "נמוכה" ל"במפלס"; הכיוון נשאר זהה בכל קו, בעוד הקבוצות מצטמקות והוודאות יורדת.

שלב 7 · הסקת מסקנות וכתיבת הדוח. תוצאה. ההשערה נתמכת: הרצפות הנמוכות נושאות יותר ברזל וטיטניום מן הגבוהות, מעבר למקרה בהשוואה המלאה ובאותו כיוון בתוך יחידות הבזלת, וגם על המישורים בלבד. מגבלות. חלק מן ההבדל נובע מן היחידות שבהן נמצאות הרצפות, שכן מול הבזלת שממש מחוץ לכל רצפה ההבדל קטן יותר (–0.44 מול –0.64 wt%) ואינו מעבר למקרה; הקבוצות המחמירות קטנות; המפות מבחינות בפרטים של כ-240 מ'. כיווני מחקר נוספים. החומרים הנדיפים של הרצפות הגבוהות ישירות, מן הספקטרום שלהן ומן התכונות התרמיות שלהן, מול הנמוכות.

מה שיש בידינו עכשיו: הרצפות של המכתשים שעל הבזלת הרכה מוינו כשהן עדיין נוזליות — הגבוהות קפאו עם החומר הקל, העשיר בחומרים נדיפים, והנמוכות התייצבו עם הברזל והטיטניום.

חלק H — רצפת המכתש

הבעיה

פני השטח של הרצפה מתעדים את מה שזעזע אותה ואת מה שמילא אותה. **הגישה:** המישוריות והחספוס של הרצפות מושווים בארבעה קווי אורך, ושלוש קריאות מועמדות זו מול זו.

חלק G קרא באיזה עומק נמצאת הרצפה; חלק זה קורא את פני השטח שלה — האם הם חלקים ומישוריים או מחוספסים ושבורים. נעשה שימוש באותן ארבע כיפות ובאותן קבוצות גודל כמו בחלק F, והחספוס, כמו אי-הסדירות של השפה, נקרא במחצית העמוקה והשמורה יותר של כל קבוצה, כדי שרצפה שהוחלקה במילוי מאוחר לא תיחשב בטעות לנחיתה רכה. לאחר מכן שלושה הסברים להבדלים מועמדים זה מול זה, והנתונים מכריעים ביניהם.

H.1 מישוריות וחספוס

הטבלה נותנת שני מדדים של הרצפה. **החלק המישורי** הוא החלק של הרצפה שהשיפוע שלו קטן מ- 2° — קרקע מפולסת למעשה. **החספוס** הוא הפיזור של השיפועים של הרצפה, הנמדדים בצעדים של 500 מ', במעלות: לרצפה חלקה יש שיפועים שמשתנים מעט, לרצפה שבורה — שיפועים שמשתנים הרבה. "W/E 0.34" פירושו שלרצפות של החצי המוביל יש שליש מן השטח המישורי של החצי המאסף; "W/E 1.50" — שהן מחוספסות פי אחד וחצי. אדום מסמן את החצי המוביל, המחספס ביותר והפחות מישורי; כחול את הצד הקרוב, המישורי ביותר על פני כל המכתשים.

מדד	90° מערב, מוביל	180°, רחוק	90° מזרח, נגרר	0°, קרוב	קריאה
מישוריות וחספוס					
שטח הרצפה בשיפוע $< 2^\circ$, מחצית עמוקה, 20–30 ק"מ	0.04	0.14	0.11	0.09	W/E 0.34 (0.26–0.49)
חספוס הרצפה, 500 מ' ($^\circ$), מחצית עמוקה, 20–30 ק"מ	4.5	2.7	3.0	3.6	W/E 1.50 (1.25–1.68)
שטח הרצפה בשיפוע $< 2^\circ$, כל המכתשים, 20–30 ק"מ	0.06	0.14	0.13	0.17	N הגבוה ביותר, W הנמוך ביותר

מישוריות וחספוס של רצפות המכתשים בארבעה קווי אורך (H.1§).

שני התחומים של החצי המוביל רחוקים היטב מ-1 (0.26–0.49 ו-1.25–1.68): במכתשים העמוקים יותר של 20–30 ק"מ רק 4% מרצפה של החצי המוביל הם מישוריים, מול 11% בחצי המאסף, והשיפועים שלה משתנים

ב-4.5° מול 3.0°. על פני כל המכתשים, כולל הרדודים יותר, לצד הקרוב יש הרצפות המישוריות ביותר, 17% משטחן.

הרצפות מחוספסות ביותר ב-90° מערב. שלוש קריאות הועמדו זו מול זו, והנתונים מפרידים ביניהן בחלקן:

קריאה	מה היא חוזה	מה הנתונים מראים
הזעזוע של נחיתה קשה חספס את הרצפה	בכל מכתש, רצפה מחוספסת הולכת יחד עם שפה משוננת, ובמידה הרבה ביותר במקום שבו הנחיתות היו הקשות ביותר	מתאם בין חספוס הרצפה לקפיצות השפה, מכתש אחר מכתש: 0.40 ב-90° מערב, 0.30 ב-90° מזרח, 0.15 ב-180°, 0.02 ב-0° — נתמכת
הרצפות הוחלקו מלמטה, על ידי הימות הכי הרבה ימות	הרצפות החלקות ביותר במקום שבו יש הכי הרבה ימות	החלק המישורי של הרצפה הגבוה ביותר בצד הקרוב, החצי של הימות, בכל קבוצת גודל (0.17, 0.16, 0.20 מול 0.13–0.16 ב-90° מזרח וב-180°); 90° מזרח ו-180° דומים, באמצע (רצפה רדודה וחלקה היא ים בהתהוות) — נתמכת לגבי הצד הקרוב
החצי המוביל פגש יותר אבק חלל, שחספס את הרצפות שלו	העודף גדל עם החשיפה: גדול יותר במכתשים הרדודים יותר מאשר בעמוקים	חספוס 90° מערב/90° מזרח: 1.40 ברדודים מול 1.50 בעמוקים (20–30 ק"מ), 1.12 מול 1.43 (30–50 ק"מ) — אינה נתמכת

שלוש קריאות של חספוס הרצפות, והמבחן של כל אחת (H.1\$).

כל שורה בטבלה זו היא מבחן: קריאה, הדפוס שהיא דורשת, והדפוס שנמצא. הקריאה הראשונה נבדקת מכתש אחר מכתש. מתאם מודד עד כמה שני גדלים עולים ויורדים יחד, מ-0 (לא קשורים) עד 1 (בצעד אחד); אם הזעזוע של הנחיתה גם שבר את השפה וגם חספס את הרצפה, השניים צריכים ללכת יחד בתוך כל מכתש, ובעוצמה הרבה ביותר במקום שבו הנחיתות היו הקשות ביותר. כך הם הולכים: 0.40 בחצי המוביל, ויורד עד 0.02 בצד הקרוב, בסדר של עוצמת הנחיתה שנמצא בחלק F. הקריאה השנייה נבדקת לפי מקום: לצד הקרוב, שבו נמצאים הימות, יש הרצפות המישוריות ביותר בכל שלוש קבוצות הגודל. השלישית נבדקת לפי גיל. מכתש רדוד יותר הוא, באופן כללי, מכתש עתיק יותר, שדפנותיו קרסו ורצפתו התמלאה עם הזמן; אבק מן החלל מצטבר עם הזמן, ולכן אילו האבק היה מחספס את הרצפות של החצי המוביל, עודף החספוס שלו היה גדול יותר במכתשים הרדודים יותר, שנחשפו זמן רב יותר. הוא קטן יותר (1.40 מול 1.50, ו-1.12 מול 1.43), ולכן החספוס היה שם מן ההתחלה.

שתי הקריאות הראשונות אינן מוציאות זו את זו. על החצי המוביל הייתה הנחיתה קשה יותר, והרצפות שלו נושאות את הזעזוע; הצד הקרוב נמצא ליד הימות, והרצפות שלו הוחלקו מלמטה. הקריאה השלישית אינה גדלה עם הגיל, ואין בה צורך. רצפה שהיא מישורית משום שהימות עלו לתוכה היא הנושא של D.2\$ ושל חלק E, ושל מאמר 5.

מה שיש בידינו עכשיו: פני השטח של הרצפה מתעדים שני דברים — את הזעזוע של הנחיתה, החזק ביותר בחצי המוביל, ואת המילוי מלמטה, החזק ביותר בצד הקרוב, ליד הימות. יחד עם השפה (חלק F) ועם עומק הרצפה (חלק G), הוא משלים את הרישום של הקרקע ושל הכוחות; האנרגיה של הנחיתה, הנקראת בפסגה המרכזית, באה בחלק I.

חלק I — הפסגה המרכזית

הבניה

הפסגה רושמת את האנרגיה של הנחיתה. **הדרך:** שיעור המכתשים שיש בהם פסגה וגובה הפסגה מעל הקרקעית מושווים בארבעה קווי אורך.

חלקים F ו-G קראו את השפה ואת הקרקעית של המכתש; חלק H — את חספוסו. החלק הזה קורא את הרכיב האחרון בצורת המכתש: הגבעה שעומדת במרכזם של מכתשים גדולים רבים. השפה רושמת את הכוחות ברגע הנחיתה, והקרקעית את הקרקע שמתחתיה; הפסגה, כפי שחלק זה מראה, רושמת כמה אנרגיה נשאה הנחיתה. יחד עם חלקים F-H הוא משלים מחקר אחד של צורת המכתשים בארבעה קווי אורך, מחקר 6, המוצג במלואו בסוף החלק.

מהי פסגה מרכזית. מכתש קטן וטרי הוא קערה פשוטה: דפנותיו יורדות אל תחתית מעוגלת. מעל גודל מסוים הצורה משתנה: הקרקעית נעשית שטוחה, ובמרכזה מתרוממת תלולית או קבוצת גבעות. התלולית הזאת היא הפסגה המרכזית. בירח השינוי מופיע במכתשים שקוטרם כ-15–20 ק"מ [S27], והספרות קוראת את הפסגה כהקפצה חוזרת של הקרקעית לאחר הנחיתה [S28]. פסגה מסמנת אפוא נחיתה שמסרה יותר אנרגיה ממה שהקרקע יכלה לספוג בכך שנדחקה הצידה; העודף חזר ועלה במרכז.

כיצד הסדרה קוראת את הפסגה. במודל, החומר החוזר היה חומר עמוק של גוף האם, שנפלט דרך הפתחים שלו (חלק J), והוא הגיע אל פני השטח כשהוא עדיין חם. הייתה לו צמיגות נמוכה — הוא זרם בקלות, כפי שסירופ חם זורם וסירופ קר אינו זורם — ולא היה לו זמן להתקרר בתעופה של דקות ספורות (K.1§). הוא נחת כמסה חמה וניידת. מסה כזאת אינה רק חופרת בור; היא דוחקת את הקרקע שמתחתיה למטה ולצדדים, והקרקע קופצת אז בחזרה במרכז. משום שהחומר שבמרכז היה עדיין רך וחם, ההקפצה יכלה להתרומם, ואז קפאה במקום שבו עמדה. הפסגה היא ההקפצה הקפואה הזאת.

I.1 הפסגה בארבעה קווי אורך

השאלה שסעיף זה עונה עליה היא אם שיעור המכתשים שיש בהם פסגה, וגובה הפסגה, שונים בין ארבעת קווי האורך במכתשים באותו גודל. ארבעת קווי האורך הם אלה של החלקים הקודמים: החצי המוביל (90° מערב), הצד הרחוק (180°), החצי המאסף (90° מזרח) והצד הקרוב (0°), כל אחד כיפה ברדיוס 30° , שממנה הוסרו הימות, אגן South Pole–Aitken (SPA) והאגנים הגדולים. הטבלה נותנת, לשלוש מחלקות גודל, את אחוז המכתשים שיש בהם פסגה (החלק העליון) ואת גובה הפסגה מעל הקרקעית במכתשים שיש בהם פסגה (החלק התחתון). יש לקרוא אותה לאורך השורה: בחלק העליון ירוק מסמן היכן פסגות נפוצות ביותר וכתום היכן נדירות ביותר, והעמודה האחרונה מציינת את הכיוון; בחלק התחתון אפור מסמן את הפסגות הגבוהות ביותר וכחול את הנמוכות ביותר, והעמודה האחרונה נותנת הפרש בין שני קווי אורך עם טווח ה-95% שלו, שנמצא בדגימה חוזרת של המכתשים (מחקר 6, שלב 6). הגבהים ניתנים באלפיות קוטר המכתש, $10^{-3} D \times$, כדי שאפשר יהיה להשוות מכתשים בגדלים שונים.

מדד	90° מערב, מוביל	180° , רחוק	90° מזרח, נגרר	0° , קרוב	קריאה
-----	---------------------------	--------------------	-----------------------	------------------	-------

מכתשים עם פסגה מרכזית (%)

30–20 ק"מ	60	46	49	56	הגבוה ביותר במערב
50–30 ק"מ	81	74	69	74	הגבוה ביותר במערב
100–50 ק"מ	94	98	81	68	הגבוה ביותר ב-180°, מערב אחריו

הפסגה המרכזית מעל הקרקעית, במכתשים שיש בהם פסגה ($D \times 10^{-3}$)

30–20 ק"מ	17	30	19	9	10–N-E (עד 2-)
50–30 ק"מ	17	17	14	15	3+E-180° (עד 9+)
100–50 ק"מ	12	14	11	12	3.0+E-180° (עד 0.4+ עד 6.9+)

טבלה: הפסגה המרכזית בארבעה קווי אורך, לפי מחלקות גודל.

הפסגות מצביעות על 90° מערב. מתחת ל-50 ק"מ, בחצי המוביל נמצאים המכתשים הרבים ביותר שיש בהם פסגה מרכזית; ב-100–50 ק"מ כמעט לכל מכתש יש פסגה, וה-98% של הצד הרחוק עוקפים במעט את ה-94% של החצי המוביל (גרסה קודמת אמרה "בכל גודל"). פסגה מרכזית היא ההקפצה החוזרת של הנחיתה. לחומר החוזר הייתה צמיגות נמוכה, ולא היה לו זמן להתקרר בתעופתו; הוא נחת כמסה חמה וניידת, דחק את הקרקע למטה ולצדדים, ובמרכז קפץ בחזרה כלפי מעלה, כפי שטיפה הנופלת לבריכה מקפיצה בחזרה עמוד דק של מים; לאחר מכן הוא התקשה במקום שבו עמד, כפסגה באמצע הקרקעית. רק נחיתה בעלת אנרגיה מספקת קופצת בחזרה כך: מכתשים קטנים נשארים קערות פשוטות, ובירח הפסגות מופיעות מכ-15–20 ק"מ. המכתשים של 20–30 ק"מ עומדים קרוב לסף הזה: בחצי המוביל, שפגש חזיתית את החומר שהגוף עצמו השליך, יש פסגה ב-60% מהם, ובצד הרחוק ב-46%. הנחיתות על הצד הרחוק היו הקשות מכולן: הן נעשו כשהגוף היה מחובר, תחת המשיכה המשולבת של הירח ושל כדור הארץ (G.28). במכתשים של 100–50 ק"מ לכל נחיתה הייתה אנרגיה מספקת, ובמכתשי הצד הרחוק יש פסגה כמעט ללא יוצא מן הכלל (98%).

מדוע דווקא גודל הסף הוא המקום לחפש בו: מבחן של עוצמה חד ביותר במקום שבו התוצאה מאוזנת. במכתש גדול כמעט כל נחיתה נשאה אנרגיה מספקת לפסגה, ולכן נחיתה קשה יותר מוסיפה מעט; במכתש שנמצא מעט מעל הסף, דחיפה קטנה נוספת מכריעה בין קערה לבין פסגה. משום כך ההבדל הברור ביותר בין החצאים, 60% מול 46%, מופיע במחלקה הקטנה ביותר. החצי המוביל הוא החצי שפגש חזיתית את החומר שהגוף עצמו השליך (חלקים F–H): מבין הנחיתות של אותו שלב, הנחיתות עליו היו הקשות ביותר, ויותר מהמכתשים הקרובים לסף שבו עברו לצורה שיש בה פסגה.

הפסגות המרכזיות הולכות אחרי השפות. במקום שבו השפות גבוהות, גם הפסגות גבוהות: הפסגות של הצד הרחוק מתרוממות הכי גבוה מעל הקרקעית שלהן, 30 אלפיות הקוטר במכתשים של 20–30 ק"מ, ו-14 מול 11 של החצי המאסף במכתשים של 100–50 ק"מ; והפסגות של הצד הקרוב הן הנמוכות ביותר, 9 במכתשים של 20–30 ק"מ. הכוח הצנטריפוגלי של הסיבוב המשותף פעל על שתיהן, על השפות ועל הפסגות כאחד: בצד הרחוק הוא הרים אותן, ובצד הקרוב לחץ אותן כלפי מטה.

הכוח הצנטריפוגלי כאן הוא הדחיפה החוצה שחש כל דבר המסתובב עם גוף מסתובב, כפי שנוסע בקרוסלה נלחץ החוצה. בסיבוב המשותף פנה הצד הרחוק החוצה, הרחק מגוף האם, והדחיפה שם הופנתה הרחק מפני

השטח: חומר רך שעמד מעל הקרקעית, השפה והפסגה כאחד, קיבל עזרה כלפי מעלה לפני שהתקשה. בצד הקרוב, הפונה אל גוף האם, אותה דחיפה החוצה הופנתה לתוך פני השטח, ואותו חומר עמד נמוך יותר. הפסגה והשפה רשמות אפוא את אותו הדבר, וההתאמה ביניהן היא בדיקה לכך שהדפוס אינו מקרה של מדידה אחת.

מה שיש בידינו עכשיו: שיעור הפסגות רושם את עוצמת הנחיתה, והוא הגבוה ביותר בחצי המוביל סמוך לגודל הסף; גובה הפסגות רושם את הסיבוב שהקליפה חלקה עם גוף האם, והוא הגבוה ביותר בצד הרחוק והנמוך ביותר בצד הקרוב. המחקר שלהלן מציג את השפה, הקרקעית, החספוס והפסגה כמחקר אחד.

STUDY 6 מחקר 6

STEP 1 הגדרת שאלת המחקר והבעיה

התופעה. המכתשים של ארבעת קווי האורך שונים במספרם (מחקר 1). **הפער בידע.** אם הנחיתות היו שונות בעוצמתן מחצי אחד לאחר, גם צורת המכתשים חייבת להיות שונה: השפה, הקרקעית, החספוס והפסגה המרכזית. הספרות מדדה את צורות המכתשים ברמה הגלובלית, אך לא זו לצד זו בארבעת קווי האורך, כשהימות מוסרים והפסגה המרכזית מוחזקת מחוץ לקרקעית. **שאלת המחקר:** האם השפה, הקרקעית שמתחת לפני הקרקע, חספוס הקרקעית והפסגה המרכזית של מכתשים באותו גודל שונים בין החצי המוביל, החצי המאסף, הצד הרחוק והצד הקרוב?

STEP 2 סקירת ספרות (רקע מדעי)

צורתו של מכתש ירחי טרי משתנה עם גודלו: מכתשים קטנים הם קערות פשוטות, ומכ-15–20 ק"מ יש למכתשים קרקעית שטוחה ופסגה מרכזית [S27]. הפסגה המרכזית נקראת כהקפצה חוזרת של הקרקעית לאחר הנחיתה [S28]. עומקו של מכתש קטן עם גילו, ככל שדפנותיו מתמוטטות וקרקעיתו מתמלאת, ולכן העומק משמש גם מדד לגיל. **מה חדש כאן:** העומק מפוצל לשלושה גבהים (A.2§), וכל אחד מהם מושווה בין ארבעת קווי האורך, כשגודל המכתש מוחזק קבוע, הפסגה ממוסכת מן הקרקעית, והימות, SPA והאגנים הגדולים מוסרים. החזקת הגודל קבוע חשובה משום שהצורה משתנה עם הגודל מעצמה; השוואה בין מכתשים בגדלים שונים הייתה מראה את הגודל, ולא את קו האורך.

STEP 3 ניסוח השערת המחקר

החצי המוביל, שעליו הנחיתות היו הקשות ביותר, נושא את סימני הנחיתה הקשה: שפות משוננות ומוארכות יותר, שפות נמוכות יותר, קרקעיות מחוספסות יותר, ויותר פסגות מרכזיות סמוך לגודל הסף. הצד הרחוק, שבו הסיבוב המשותף הרים את החומר החוצה, נושא את השפות והפסגות הגבוהות ביותר ואת הקרקעיות הנמוכות ביותר, השקועות בשכבותיו; הצד הקרוב — את השפות הנמוכות ביותר ואת הקרקעיות הגבוהות ביותר.

STEP 4 מערך המחקר (מתודולוגיה)

סוג המחקר: כמותי; מדדי צורה מושווים בין אזורים, גודל אחר גודל. **המדגם:** 1,457 מכתשים של 20–100 ק"מ בארבע כיפות ברדיוס 30°, שמרכזיהן ב-90° מערב, 180°, 90° מזרח ו-0°, לאחר הסרת הימות, SPA והאגנים הגדולים. **הכלים:** מודל הגבהים SLDEM2015 ברזולוציה של כ-60 מ' [S7], הקטלוג של [S6] Robbins, וקוד שעוקב אחר כל שפה ב-72 כיווני אזימוט וקורא את הקרקעית כשהפסגה ממוסכת. הטבלה שלהלן מתרגמת כל מדד למילים פשוטות.

מדד	משמעותו, במילים פשוטות
אי-סדירות השפה	כמה גובה השפה קופץ לאורך המעגל: שפה שבורה קופצת יותר
הארכת השפה	כמה השפה סוטה ממעגל: הגעה באלכסון מותחת אותה

השפה מעל פני הקרקע	כמה גבוה השפה עומדת מעל הקרקע שסביב המכתש
הקרקעית מתחת לפני הקרקע	כמה עמוק הקרקעית שוכבת מתחת לקרקע שסביבה, בלי הפסגה
חספוס הקרקעית	כמה הקרקעית לא אחידה, לפי פיזור השיפועים שלה
פסגה מרכזית	אם יש למכתש פסגה, וכמה גבוה היא עומדת מעל הקרקעית שלו

טבלה: מדדי הצורה של מחקר 6 במילים פשוטות.

STEP 5 איסוף הנתונים (ביצוע המחקר)

כל מכתש נמדד על מודל הגבהים ב-72 כיווני אזימוט. טביעת הרגל של הפסגה המרכזית סומנה והוסרה לפני שהקרקעית נקראה, פעם אחת עד 0.4 מהרדיוס ופעם אחת על הטבעת של 0.2–0.5; שתי הדרכים מסכימות. הערכים הם הטבלאות של חלקים I–F. הפסגה מוסרת משום שפסגה במרכז מגביהה את הגובה החציוני של הקרקעית; בלי המסכה, החצי שיש בו הכי הרבה פסגות היה נראה כבעל הקרקעיות הגבוהות ביותר מסיבה זו בלבד (G.1§).

STEP 6 ניתוח הנתונים ועיבודם

טווחים. כל הפרש בין שני אזורים ניתן עם טווח 95% שנמצא בדגימה חוזרת: המכתשים נדגמים מחדש באקראי פעמים רבות, ההפרש מחושב מחדש בכל פעם, ו-95% האמצעיים של התוצאות נשמרים. הפרש שהטווח שלו אינו כולל את האפס אינו מוסבר במקרה. **השפות.** במכתשים של 20–30 ק"מ השפות של החצי המוביל הן הלא-סדירות ביותר (יחס לחצי המאסף 1.25, טווח 1.00–1.48), והן נמוכות ב-4.5 אלפיות הקוטר מאלה של החצי המאסף, כשהטווח אינו כולל את האפס. מעל 30 ק"מ השפות של הצד הרחוק הן הגבוהות ביותר. **הקרקעיות.** הקרקעיות של הצד הרחוק שוכבות הכי נמוך בכל גודל, ב-9 עד 18 אלפיות הקוטר יותר מאלה של החצי המאסף, וכל הטווחים אינם כוללים את האפס; אלה של הצד הקרוב הן הגבוהות ביותר; החצי המוביל והחצי המאסף דומים. **הפסגות.** סמוך לגודל הסף, 20–30 ק"מ, בחצי המוביל יש פסגה ב-60% מהמכתשים, מול 46% בצד הרחוק; ב-50–100 ק"מ יש פסגה ב-98% ממכתשי הצד הרחוק.

STEP 7 הסקת מסקנות וכתיבת הדוח

תוצאה. ההשערה נתמכת בחלקיה העיקריים: החצי המוביל נושא את סימני הנחיתה הקשה בשפותיו ובפסגותיו, הצד הרחוק את השפות הגבוהות ביותר ואת הקרקעיות הנמוכות ביותר, והצד הקרוב את השפות הנמוכות ביותר ואת הקרקעיות הגבוהות ביותר. בין שני החצאים, השפה היא ששונה, ולא הקרקעית. **מגבלות.** חלק מהטווחים, של השפות במכתשים הגדולים יותר, כוללים את האפס; השטח היבשתי של הצד הקרוב קטן לאחר הסרת הימות, והמדגמים שלו הם הקטנים ביותר; מכתש מבוגר יותר הוא גם רדוד יותר, ולכן הגיל והנחיתה אינם מופרדים לגמרי על סמך הצורה בלבד. **כיווני מחקר נוספים.** אותם מדדים במכתשים של 5–20 ק"מ, שבהם הספירות גדולות יותר, ומודל של השפה הנבנית בנחיתה תחת הסיבוב המשותף, שייתן את הגודל הצפוי של כל הפרש.

חלק J — המנוע

הבעיה

הלחץ העמוק, מהירות הפליטה ומהירות הנחיתה הם גדלים שונים. **הדרך:** האנרגיה בפתח, ההלם בנחיתה, המעבר דרך האדים ותקרת המהירות מוצגים יחד עם מה שהם דורשים.

חלקים C-I קראו את המכתשים כפי שהם. החלק הזה שואל את השאלה הפיזיקלית שמאחורי כולם: האם חומר שנזרק מפתח יכול לחזור מהר מספיק כדי ליצור מכתש ולהשאיר את סימני ההלם בקרקע שעליה הוא נוחת? יש להחזיק שלושה גדלים בנפרד. הלחץ העמוק הוא הלחץ בתוך גוף האם שהרים את החומר אל הפתח (מאמר 3). מהירות הפליטה היא המהירות שבה החומר עוזב את הפתח. מהירות הנחיתה היא המהירות שבה הוא פוגש את פני השטח המקבלים. כל אחד מהם נקבע בידי פיזיקה אחרת, ואין להעביר מסקנה על אחד מהם לאחר בלי חישוב. הסעיפים שלהלן עוסקים בהם לפי הסדר: האנרגיה הנדרשת בפתח (J.1§), הלחץ שנוצר בנחיתה (J.2§), ההפסדים בדרך דרך האדים (J.3§), מצבו של החומר המגיע ומצבם של פני השטח שמקבלים אותו (J.4§), והגבול העליון על מהירותו של חומר שנשאר קשור לכדור הארץ (J.5§). התעופות עצמן — משכן, גובהן והמקום שבו הן נוחתות — מחושבות בחלק K.

J.1 האנרגיה הזמינה בפתח

השאלה שסעיף זה עונה עליה היא כמה אנרגיה כל קילוגרם חייב לקבל בפתח כדי לצאת במהירות נתונה, ומאין האנרגיה הזאת יכולה לבוא.

עבור יחידת מסה הנפלטת במהירות u , האנרגיה הקינטית ביחס לפתח היא:

$$q_{\text{kin}} = \frac{u^2}{2}.$$

במילים: אנרגיית התנועה של קילוגרם אחד היא מחצית ריבוע מהירותו. משום שהמהירות מועלית בריבוע, (5) הכפלת המהירות דורשת פי ארבעה אנרגיה. מהירויות של 2, 3, 5 ו-8 ק"מ/ש' דורשות בהתאמה 2, 4.5, 12.5 ו-32 מגה-ג'אול לק"ג. מגה-ג'אול לקילוגרם הוא קנה מידה מוכר: 12.5 מגה-ג'אול לק"ג, המחיר של 5 ק"מ/ש', הם חלק ניכר מהאנרגיה הכימית האגורה בקילוגרם של דלק. לכן האנרגיה חייבת להימסר בפתח בידי מקור מוגדר, והחשבון חייב להראות אותו.

בחומר שאינו דחיס, הפרש לחצים מקומי יכול לספק לכל היותר $\Delta p/\rho$ ליחידת מסה, בהמרה אידיאלית. זה הכלל המוכר של סילון מים: הפרש לחצים Δp על פני פיה יכול לתת לכל קילוגרם לכל היותר $\Delta p/\rho$ של אנרגיה, ובפועל פחות. בחומר המתפשט יש לחשב את ירידת האנטלפיה או את עבודת הלחץ לאורך מסלול תרמודינמי, יחד עם החום, הכבידה וההפסדים. כאן החומר אינו נוזל דומם: גז המומס בו יוצא מהתמיסה ומתפשט ככל שהלחץ יורד, וההתפשטות הזאת עושה עבודה על המגמה שסביבו.

מחיר ההרמה של 139.78 ג'יגה-פסקל במאמר 3 אינו מאגר נוסף בפתח, אחרי שהחומר כבר הורם. גם יתרת הלחץ הרדיאלית של 2.074 ג'יגה-פסקל בדוגמה מסוימת במאמר 3 אינה תקציב פליטה שהוקצה ונפתר. המבחן דורש שתישאר אנרגיה מספקת למשוואה (5) לאחר שנלקחו בחשבון מחירי האנרגיה של ההרמה, הזרימה ונשיאת העומס. המרה אידיאלית של לחץ למהירות אינה חסם תחתון מובטח על המהירות.

מאין באה אנרגיית הפליטה. הלחץ שמשליך את החומר החוצה הוא הלחץ מכדור הארץ. הסיבוב והמיון — מנגנון אחד (מאמר 3) — יוצרים אותו בפנים כדור הארץ; הוא עובר דרך האגס אל הגוף, מגיע אל הפתחים, שהם מוצאיו, ומתיז מהם את החומר, כפי שהלחץ בצינור השקיה זורק את המים מן הפייה. הנדיפים מסייעים: מים וגזים אחרים המומסים תחת לחץ במגמה העמוקה יוצאים מן התמיסה כשהמגמה מתקרבת לפתח, מתפשטים ומוסיפים את דחיפתם לזריקה. בקבוק סודה מנוער מראה את החלק הזה בקנה מידה קטן: הגז שעוזב את הנוזל משליך את הנוזל החוצה. חשבון האנרגיה המלא — כמה מן הלחץ מגיע אל הפתח לאחר מחירי ההרמה, הזרימה ונשיאת העומס, וכמה מוסיפים הנדיפים — הוא דרישה של המודל: יחד הם חייבים לספק $u^2/2$ לכל קילוגרם עבור המהירויות שהמכתשים דורשים.

3.2 מהירות ולחץ הלם

השאלה שסעיף זה עונה עליה היא איזה לחץ יוצר החומר החוזר בקרקע כשהוא נוחת במהירות נתונה. הלחץ חשוב משום שנחיתה נרשמת במינרלים של הקרקע רק מעל לחצים מסוימים (מטמורפיזם הלם); מכתש שנוצר בהגעה רכה ומכתש שנוצר בהלם נראים שונים במעבדה.

מהו הלם, ומהו Hugoniot. כאשר גוף נוחת מהר יותר ממהירות הקול בקרקע, הקרקע שלפני המגע אינה יכולה לזוז מן הדרך בזמן. נוצרת חזית חדה, הלם, שעל פניה הלחץ, הצפיפות והמהירות קופצים. שתי מהירויות מתארות אותו: מהירות החזית עצמה, U_s , והמהירות u_p שהחומר שמאחורי החזית רוכש (מהירות החלקיק). ברוב המוצקים, כפי שנמדד במעבדה, שתיהן קשורות בקו ישר, $U_s = C_0 + su_p$; הקו הזה הוא Hugoniot של החומר. C_0 קרוב למהירות הקול בחומר, מהירות החזית בהלם חלש מאוד, ו- s אומר כמה מהר יותר החזית רצה ככל שההלם מתחזק.

התאמת עכבות. במגע, לשני הצדדים חייבים להיות אותו לחץ ואותה מהירות, אחרת הם היו נפרדים או עוברים זה דרך זה. כאשר הגוף המגיע והקרקע עשויים מאותו חומר, הם קשיחים באותה מידה, והקפיצה במהירות מתחלקת שווה בשווה: הגוף המגיע מאט במחצית מהירותו, והקרקע שמתחתיו מוכנסת לתנועה במחצית המהירות הזאת. מכאן הכלל שלהלן. בשני חומרים שונים — מגמה חמה על קרום קר, למשל — הצד הקשיח יותר לוקח את החלק הקטן יותר, ויש לפתור את החלוקה משני Hugoniot; זו משמעותה של התאמת עכבות.

בנחיתה מישורית וחזיתית של חומרים זהים, מהירות החלקיק מאחורי חזית ההלם היא $u_p = v_n/2$, כאשר v_n היא מהירות הנחיתה הניצבת. בשימוש ביחס של בזלת, $U_s = C_0 + su_p$:

$$P - P_0 = \rho_0 U_s u_p = \rho_0 \left(C_0 + s \frac{v_n}{2} \right) \frac{v_n}{2}.$$

במילים: קפיצת הלחץ על פני ההלם שווה לצפיפות הקרקע שלא הופרעה, ρ_0 , כפול מהירות החזית, כפול (6) המהירות שניתנה לחומר. זהו מאזן התנע על פני החזית: בכל שנייה החזית אוספת מסה $\rho_0 U_s$ לכל מטר רבוע ומכניסה אותה לתנועה במהירות u_p , והכוח למטר רבוע הנדרש לשם כך הוא הלחץ. P_0 הוא הלחץ לפני ההלם, והוא קטן. משום ש- U_s עצמה גדלה עם מהירות הנחיתה, הלחץ גדל מעט מהר יותר מאשר ביחס ישר למהירות.

Sekine ועמיתיו נותנים $C_0 = 3.5$ ק"מ/ש' ו- $s = 1.3$, בקירוב, לענף הלחץ הנמוך עד u_p של כ-4 ק"מ/ש'. הניסויים של המאמר עצמו הגיעו לכ-25 ג'יגה-פסקל; העקומה הרחבה יותר נשענת גם על השוואות עם נתונים נוספים [S3]. בצפיפות ייחוס של 2,700 ק"ג/מ"ק:

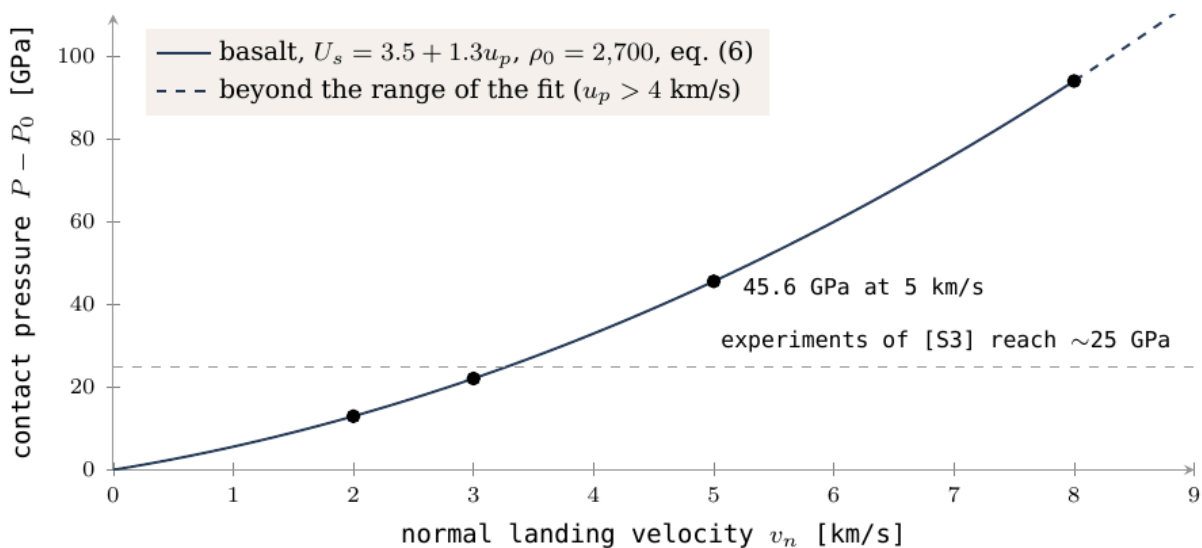
u_p , ק"מ/ש'	$P - P_0$ משוער, ג'יגה-פסקל	v_n , ק"מ/ש'
2	1	12.96
3	1.5	22.07
5	2.5	45.56

טבלה: לחץ המגע בנחיתה חזיתית של בזלת על בזלת, לפי משוואה (6), בצפיפות 2,700 ק"ג/מ"ק.

את הטבלה קוראים כלפי מטה: כל שורה היא מהירות נחיתה אחת, מהירות החלקיק שהיא נותנת (מחצית המהירות), ולחץ המגע לפי משוואה (6). ב-5 ק"מ/ש', הדוגמה המשמשת לאורך כל המאמר, החזית רצה ב-3.5 ועוד 1.3 כפול 2.5 ק"מ/ש', ולחץ המגע הוא 45.56 ג'יגה-פסקל — כמה מאות אלפי מונים מלחץ האוויר בגובה פני הים. אפילו השורה האיטית ביותר, 2 ק"מ/ש', נותנת 12.96 ג'יגה-פסקל. בשורה האחרונה, 8 ק"מ/ש', מהירות החלקיק היא 4 ק"מ/ש', בקצה העליון של התחום שבו הותאם ה-Hugoniot הישר, ויש לקרוא אותה בזהירות הזאת.

אלה לחצי מגע מקומיים בדוגמה אידיאלית, ולא לחצים הפועלים באופן אחיד על פני המכתש כולו. בנחיתה אלכסונית, בתווך נקבובי או בזוג מגמה-סיאל יש לפתור את התאמת העכבות ואת משוואות המצב המתאימות. אין להשתמש בצפיפות מוקצפת לצורך הפליטה, ואז להניח שהגוף החוזר נעשה בזלת צפופה בלי מסלול של דחיסה או התמצקות. הסיבה היא עקביות: אי אפשר למנות את אותו חומר כקל ומוקצף במקום שבו הקלות עוזרת (ביציאה מן הפתח) וכצפוף במקום שבו הצפיפות עוזרת (בלחץ הנחיתה), אלא אם כן מוצג המסלול בין שני המצבים.

איור 7 משרטט את משוואה (6) כעקומה. הקו הרציף הוא תחום ההתאמה, ההמשך המקווקו נמצא מעבר לו, והנקודות הן שורות הטבלה. הקו האופקי המקווקו מסמן את 25 ג'יגה-פסקל שהושגו בניסויים של [S3]: מתחתיו העקומה נשענת על מדידה ישירה, ומעליו על הקו המותאם ועל השוואה עם נתונים נוספים.



איור 7. לחץ המגע בנחיתה מישורית וחזיתית אידיאלית של בזלת על בזלת, כפונקציה של מהירות הנחיתה (J.28). מקומי ואידיאלי; נחיתות אלכסוניות, חומר נקבובי או מוקצף זוג מגמה-סיאל דורשים התאמת עכבות ומשוואות מצב משלהם. (בשרטוט: ציר אופקי — מהירות הנחיתה הניצבת v_n בק"מ/ש'; ציר אנכי — לחץ המגע $P - P_0$ בג'יגה-פסקל; הקו הכחול-כהה הרציף — בזלת, הטבלה; הקו האופקי המקווקו — "הניסויים של [S3] מגיעים לכ-25 ג'יגה-פסקל"; ליד הנקודה ב-5 ק"מ/ש' — "45.6 ג'יגה-פסקל ב-5 ק"מ/ש'"; ההמשך המקווקו — "מעבר לתחום ההתאמה ($u_p > 4$ ק"מ/ש'"); הנקודות — שורות (6), $\rho_0 = 2700$, $U_s = 3.5 + 1.3u_p$ משוואה (6); "המשך המקווקו — "מעבר לתחום ההתאמה ($u_p > 4$ ק"מ/ש'"); הנקודות — שורות (6), $\rho_0 = 2700$, $U_s = 3.5 + 1.3u_p$ משוואה (6); "הניסויים של [S3] מגיעים לכ-25 ג'יגה-פסקל"; ליד הנקודה ב-5 ק"מ/ש' — "45.6 ג'יגה-פסקל ב-5 ק"מ/ש'".

האם נוזל יכול ליצור הלם? מומחה עשוי לטעון שגוף חוזר מותך רך מכדי להלום את הקרקע. אין זה כך: נוזל מתנגד לדחיסה כמעט בעוצמה של מוצק, וגל דחיסה עובר בו באותו אופן; מה שחסר לנוזל הוא חוזק מול גזירה, ולא קשיחות מול לחיצה. גוף חוזר נוזלי יכול להעביר גל דחיסה; התמצקות מלאה אינה תנאי ליצירת ההלם עצמו.

עם זאת, הגודל, הצפיפות, הפיזור והחום של הגוף החוזר משפיעים על הלחץ, על משך הפולס ועל החפירה. ספי השינויים המינרליים תלויים בסוג החומר ובמצבו [S4]. נחיתה איטית יותר יכולה גם ליצור מכתש משני בתנאים מתאימים [S1]; אין סף אוניברסלי שמתחתיו "שום דבר אינו נרשם".

3.3 אטמוספירת האדים היא חלק מן המבחן

השאלה שסעיף זה עונה עליה היא כמה מהירות מאבד החומר החוזר בדרכו דרך האדים שהקיפו את גוף האם בתרחיש. הדבר חשוב משום שלחץ הנחיתה של $J.2\S$ תלוי במהירות הנחיתה, וכל קילומטר לשנייה שאובד באוויר אובד מן המכתש.

טבלאות התעופה מניחות ריק. בסביבת האדים של התרחיש יש לבחון את עמוד החומר שהגוף החוזר עובר דרכו. נגדיר מקדם בליסטי $B = m_p / (C_D A_p)$ ועמוד אטמוספרי לאורך המסלול Σ_a . במודל של גרר בלבד, במסה ובשטח קבועים וללא כוחות אחרים:

$$\frac{v_{out}}{v_{in}} = \exp \left(-\frac{\Sigma_a}{2B} \right).$$

הסמלים: m_p היא מסת הגוף החוזר, A_p חתך הרוחב שלו הפונה אל הזרימה, ו- C_D מקדם הגרר שלו, מספר (7) הקרוב לאחד בגוף קהה. המקדם הבליסטי B הוא אפוא מסה ליחידת שטח חזיתי: הוא אומר כמה גוף עומד מאחורי כל מטר רבוע שדוחק את הגז הצידה. לכדור תותח יש B גדול, ולנוצה B קטן. Σ_a היא מסת הגז למטר רבוע שנמצאת לאורך המסלול — משקל עמוד האוויר שהגוף חייב לדחוק דרכו, מבוטא כמסה. משוואה (7) אומרת שהגוף שומר על מהירותו כל עוד הגז שהוא פוגש קטן בהשוואה למסה שלו לכל יחידת שטח; כשהשניים נעשים דומים, המהירות דועכת באופן מעריכי. גוף כבד ודחוס עובר כמעט בלי פגע; גוף קל או מפורר דק נעצר.

לשם דוגמה בלבד, גוף כדורי בקוטר קילומטר אחד, בצפיפות 2,700 וב- $C_D = 1$, נותן $B = 1.8 \times 10^6$ ק"ג/מ"ר. שני מעברים כמעט אנכיים דרך עמוד הידרוסטטי, בלחץ בסיס מאומץ של 100 בר וב- $g_{eff} = 8.25$, נותנים $\Sigma_a/B \simeq 1.35$, ומקדם דעיכת מהירות של כ-0.51 במודל הגרר. 100 בר אינם לחץ משוחזר של האטמוספירה הקדומה.

שני המעברים הם הדרך למעלה והדרך למטה: החומר עוזב את הפתח דרך האדים וחוזר דרכם. בעמוד שבמנוחה, לחץ הבסיס שווה למשקל הגז שמעל כל מטר רבוע, ולכן Σ_a למעבר אחד הוא לחץ הבסיס חלקי הכבידה האפקטיבית. בשני המעברים יחד העמוד גדול פי 1.35 מה- B של הגוף, והגוף מגיע בכמחצית המהירות שהייתה לו בריק. גוף שנזרק ב-5 ק"מ/ש' היה נוחת בכ-2.5 ק"מ/ש'; לפי איור 7 זה עדיין נותן לחץ מגע מעל 12.96 ג'יגה-פסקל, הערך ב-2 ק"מ/ש'.

הדוגמה מראה שהגרר אינו תיקון שתמיד אפשר להזניח. במסלול אמיתי יש לפתור את הכבידה ואת הגרר יחד; גם חימום, התפרקות ותנועת הגז משנים את B . הנדיפים עשויים לסייע בפליטה, ובאותו זמן להקשות על מעבר מהיר דרך האטמוספירה. תחום פרמטרים אחד חייב לקיים גם את דרישת הפליטה וגם את דרישת המעבר באטמוספירה. במילים פשוטות: אותם גזים שמשליכים את החומר החוצה (J.1\S) יוצרים גם את האדים שהוא חייב לחצות, כך שיותר גז עוזר להשלכה ומעכב את התעופה. המודל דורש טווח של תכולת גז, גודל גוף ולחץ אדים שבו שתי הדרישות מתקיימות בבת אחת.

3.4 גוש נוחת, ענן של חומר ופני שטח משמרים

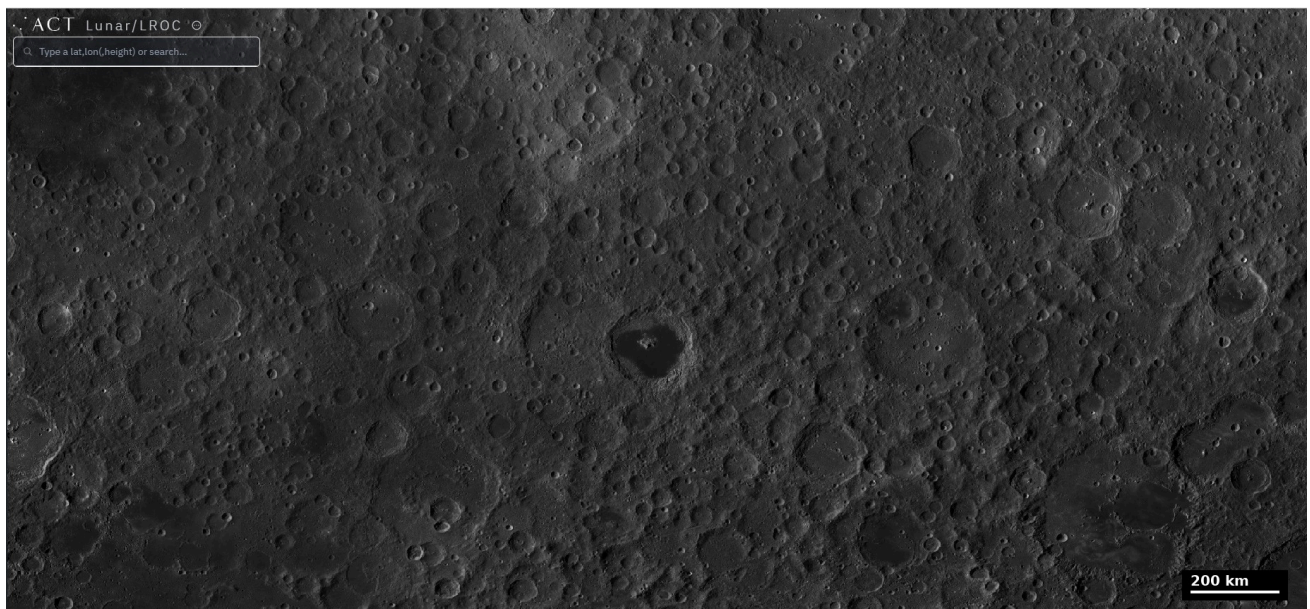
השאלה שסעיף זה עונה עליה היא באיזה מצב החומר חייב להגיע, ואיזה סוג של פני שטח חייב לקבל אותו, כדי שמכתש ייווצר ויישמר.

אותה מסה, כשהיא מגיעה כגוש צפוף או כענן מפוזר, אינה יוצרת את אותו פולס הלם. גוש מוסר את התנע שלו לשטח קטן בזמן קצר, והלחץ גבוה; ענן מפזר את אותו תנע על שטח רחב ולאורך זמן ארוך יותר, כפי שדלי מים

שנשפך מגובה מכה אחרת מגוש קרח יחיד באותו משקל. זמן העיוות הגאותי לבדו אינו קובע אם גוש מתפרק: יש לכלול גם צמיגות, חוזק, מתח פנים, ולעתים כבידה עצמית. הצמיגות מתנגדת למתיחה של גוש רך; החוזק מחזיק יחד גוש מוצק; מתח הפנים מחזיק טיפה, כפי שהוא מחזיק טיפה היוצאת ממזרק; ובגוף גדול הכבידה שלו עצמו עושה את אותו הדבר. אין בסיס להנחה שכל גוש שעובר מרחק רב מגיע שלם, או שכל גוף חוזר מותר מאבד את יכולתו ליצור מכתש.

פני השטח המקבלים חייבים להיות עבים וחזקים מספיק ביחס לגודל המכתש (איור 8). שכבה קופאת בעובי מטר אחד אינה מוכיחה שימור של מכתש שקוטרו קילומטרים. מאמר 3 עוסק בקליפה: קשיחה וקרה בפני השטח, ניידת בבסיסה. המבחן כאן מוסיף את החימום בנחיתה ואת הצורך שהרישום ייווצר לפני קבורה או הרפיה. הרפיה היא ההשטחה האיטית של מכתש שהקרקע שלו רכה מכדי להחזיק את צורתו, כפי שגומה שנלחצה לתוך דבש סמיך נסגרת עם הזמן; מכתש שורד רק אם הקרקע שמתחתיו קשיחה מספיק, עד עומק בסדר גודל של גודלו, לאורך זמן מספיק.

איור 8 מראה כיצד פני שטח כאלה נראים כיום. הרמות של הצד הרחוק סביב Tsiolkovskiy מכוסות מכתשים בכל הגדלים, כל אחד חופף את הבא, על הקרום העבה ביותר של הירח. במודל זהו הרישום העתיק ביותר, שנוצר על הקליפה כשעוד שכבה על גוף האם ונישא כלפי מעלה יחד איתה.



איור 8. הרמות של הצד הרחוק סביב Tsiolkovskiy (במרכז; 20° דרום, 129° מזרח, 185 ק"מ, המכתש הכהה שקרקעיתו ים ושיש בו פסגה מרכזית), פסיפס LROC WAC ברזולוציה של כ-1.6 ק"מ לפיקסל, ברוחב של כ-3,000 ק"מ. פני שטח רוויים במכתשים בכל הגדלים על הקרום העבה ביותר של הירח: פני השטח המקבלים שהיו עבים וחזקים מספיק, והרישום העתיק ביותר, שנישא כלפי מעלה על הקליפה (מאמר 3, B.6§). קרדיט: LROC QuickMap; פסיפס LROC WAC (NASA/GSFC/Arizona State University).

3.5 קשירה כבידתית ותקרת מהירות

השאלה שסעיף זה עונה עליה היא באיזו מהירות אפשר לזרוק חומר כך שעדיין יחזור. חומר שנזרק מהר מדי עוזב את כדור הארץ לתמיד ואינו יוצר מכתש על הקליפה; התקרה חוסמת אפוא את המהירויות שהמכתשים יכולים לרשום.

במודל המרכזי, $\mathcal{E} < 0$ נותן עבור פליטה רדיאלית:

$$u < u_{\text{esc}} = \sqrt{\frac{2K}{r_0} - \omega^2 r_0^2} \simeq 10.748 \text{ km s}^{-1}.$$

שימור אנרגיה בשדה מרכזי. בשדה שמושך לעבר מרכז אחד ואינו משתנה בזמן, האנרגיה הכוללת של גוף (8) נזרק — אנרגיית התנועה ועוד אנרגיית המיקום — נשארת קבועה לאורך תעופתו. $\mathcal{E}$ היא הסכום הזה, לקילוגרם (משוואה 10 של K.1§). גוף שהאנרגיה הכוללת שלו שלילית אינו יכול לטפס אל מחוץ לשדה: הוא עולה, מאט ונופל בחזרה. גוף שהאנרגיה הכוללת שלו חיובית בורח. $K = GM_0$ הוא עוצמת השדה הארצי, r_0 הרדיוס שממנו החומר נזרק (6,721 ק"מ בדוגמה), ו- ω קצב הסיבוב של גוף האם. האיבר $2K/r_0$ הוא ריבוע מהירות הבריחה מגוף שבמנוחה. האיבר השני, $\omega^2 r_0^2$, הוא החלק שהסיבוב כבר שילם: חומר על קו המשווה של פני שטח מסתובבים נע הצידה יחד עם פני השטח האלה במהירות ωr_0 עוד לפני שנזרק, והתנועה הצידית הזאת היא חלק מן האנרגיה שלו. הזריקה הרדיאלית צריכה לספק רק את השאר. מתחת ל-10.748 ק"מ/ש' החומר קשור וחוזר; מעל זה, הוא עוזב.

אותה מהירות צידית מסבירה מדוע החומר נוחת ממערב (K.1§). כשהוא נזרק ישר למעלה, הוא שומר על המהירות הצידית שהייתה לו על פני השטח; אבל ככל שהוא עולה, המהירות הזאת נושאת אותו דרך זווית קטנה יותר בכל שנייה מזו שפני השטח מסתובבים בה, משום שאותה מהירות ברדיוס גדול יותר עוברת זווית קטנה יותר — ילדה שהולכת החוצה על קרוסלה מסתובבת מפגרת אחרי הקרשים שמתחתיה. כשהחומר יורד, הקרקע שמתחתיו כבר נעה מזרחה, והנחיתה נמצאת ממערב לפתח: כ-1,032 ק"מ מערבה בזריקה של 5 ק"מ/ש', אחרי 28 דקות באוויר. שימור האנרגיה נותן גם את מהירות החזרה: ללא גרר ובשדה שלא השתנה, לחומר שחוזר לרדיוס שממנו יצא יש אותה אנרגיה כוללת ואותה מהירות צידית, ולכן מהירותו הרדיאלית היא שוב u , וביחס לפני השטח המסתובבים הוא נוחת במהירות שבה נזרק.

הישארות קשור כבידתית לכדור הארץ אינה מבטיחה נחיתה על הקליפה. החומר יכול לנחות על אזור אחר, להיבלע בגוף האם, או להשתנות במפגש עם הגוף המתפתח. עבור רכיב קשור בשדה מרכזי, חסם כללי ורחב יותר על המהירות היחסית הוא:

$$v_{\text{rel}} < \sqrt{\frac{2K}{r}} + |\mathbf{v}_{\text{target}}|.$$

במילים: גוף שעדיין קשור לשדה אינו יכול לנוע ברדיוס r מהר יותר ממהירות הבריחה ברדיוס הזה, $\sqrt{2K/r}$; (9) פני השטח שעליהם הוא נוחת נעים במהירות $\mathbf{v}_{\text{target}}$; ומהירות ההתקרבות הגדולה ביותר האפשרית היא סכום השתיים, כמו בשתי מכוניות הנפגשות חזיתית. החסם אינו בהכרח בר-השגה בגאומטריית פליטה מסוימת. תקרות ההלם הישנות של 113 או 97 ג'יגה-פסקל אינן תקרות לכל חומר שמקורו במערכת כדור הארץ-ירח. הן היו תלויות במשפחת המסלולים ובחומר שנבחר, וחלקן היו מעבר לתחום של קירוב ההלם. לכן דגימה מעל מספר כזה אינה מוציאה כשלעצמה כל מקור ארצי.

רדיוס Hill הוא קנה מידה דינמי, ולא גבול שבו כבידת הירח נעלמת. זהו המרחק מגוף קטן שבתוכו משיכתו שלו על חלקיק סמוך גוברת על המשיכה הגאותית של הגוף הגדול שסביבו הוא מקיף; בתוכו הגוף הקטן מחזיק את החומר שלו, ומחוצה לו הגוף הגדול שולט. בייחוס המאוחר של 17,631 ק"מ, עם מסת הירח המלאה וצפיפות גוף של 2,600, מתקבל $r_H \approx 2,822$ ק"מ ורדיוס גוף של כ-1,890 ק"מ. נפילה ממנוחה מ- r_H בכבידת הירח בלבד נותנת כ-1.31 ק"מ/ש', אבל זהו ניסוי חישובי מוגבל ולא תקרה לגוף חוזר שכבר נמצא בתנועה. ההשוואה הזאת נוגעת למצב מאוחר יותר, ואי אפשר לצרף אותה לשדה המוקדם המשמש בטבלאות כאילו שניהם מתארים את אותו מצב.

מה שיש בידינו עכשיו: זריקה של כמה קילומטרים לשנייה צריכה $u^2/2$ לכל קילוגרם בפתח, שמספק הלחץ מכדור הארץ בסיוע הנדיפים; החומר חוזר במהירות שבה נזרק, נוחת ממערב לפתח שלו, וכשהוא נוחת על בזלת הוא יוצר לחץ מגע של עשרות ג'יגה-פסקלים; האדים יכולים להוריד את המהירות הזאת למחצית, ולכן גודל הגוף החוזר ותכולת הגז נכנסים למבחן יחד; וכל זריקה מתחת ל-10.748 ק"מ/ש' נשארת קשורה. חלק K מחשב את התעופות.

חלק K — הגאומטריה

הבעיה

המקום שבו החומר החוזר נוחת נקבע בידי המעוף ובידי פני השטח המסתובבים. **הדרך:** מחושבים המעופים מגוף האם ומן הגוף, ומקומות הנחיתה שלהם ממופים.

חלק N שאל כמה אנרגיה נשא החומר כשיצא מפתח, ואיזה הלם הוא יכול היה ליצור בנחיתה. חלק זה שואל את השאלה הבאה: כשהחומר כבר באוויר, היכן הוא יורד, ובאיזו מהירות הוא נוחת ביחס לקרקע שעליה הוא נוחת? התשובה תלויה בשני דברים בלבד: במעוף עצמו, שנקבע בידי מהירות הזריקה והכבידה של גוף האם, ובתנועת פני השטח שמתחתיו, שממשיכים להסתובב בזמן שהחומר באוויר. אנו בוחנים שלושה מקרים בזה אחר זה. חומר שעוזב את קליפת גוף האם ונופל בחזרה על אותה קליפה (K.1§); חומר שעוזב את גוף האם ונוחת על משטח גבוה יותר, כמו הכיפה העולה או הגוף המתפתח (K.2§), ומה זה אומר ואינו אומר על מגמה של הלם לאורך הזמן (K.3§); וחומר שנזרק מן הגוף עצמו, לאחר שעלה, ונופל בחזרה על הגוף (K.4§). המקרה האחרון הוא זה שקובע את קווי האורך: הוא מסביר מדוע החצי המאסף של הירח, שמרכזו ב-90° מזרח, הוא הצפוף ביותר במכתשים, ומדוע החצי המוביל, שמרכזו ב-90° מערב, הוא זה שעליו נחתו המכתשים בעוצמה הרבה ביותר.

K.1 חזרה אל הקליפה באותו גובה

השאלה כאן פשוטה: חומר נזרק ישר למעלה מקו המשווה של גוף האם המסתובב וחוזר לאותו גובה. באיזו מהירות הוא פוגע בקרקע, והיכן?

נסמן $\omega = 2\pi/T$, המהירות הזוויתית של פני השטח, כאשר T הוא זמן הסיבוב (5.5 שעות בדוגמה; ראו את טבלת הסביבה). לחומר שנזרק רדיאלית מפני השטח, ישר למעלה, יש גם מהירות משיקית התחלתית ωr_0 : המהירות הצידיית שחלק עם הקרקע המסתובבת ברגע שעזב אותה, כאשר r_0 הוא הרדיוס של נקודת הזריקה. שני גדלים נשמרים במהלך מעוף בשדה שאינו משתנה וללא גרר אוויר. הראשון הוא האנרגיה ליחידת מסה, $\mathcal{E}$: האנרגיה הקינטית של התנועה הרדיאלית והמשיקית יחד, פחות עומק בור הכבידה, K/r_0 , כאשר $K = GM_0$ הוא קבוע הכבידה כפול המסה המוקדמת של גוף האם. השני הוא התנע הזוויתי ליחידת מסה, ℓ : המהירות המשיקית כפול המרחק מהמרכז, שמודד כמה "סיבוב" החומר נושא איתו. במערכת ייחוס אינרציאלית — כזו שאינה מסתובבת עם פני השטח — הם:

$$\mathcal{E} = \frac{u^2 + \omega^2 r_0^2}{2} - \frac{K}{r_0}, \quad \ell = \omega r_0^2.$$

כאן u היא מהירות הזריקה, הנמדדת ביחס לקרקע. בחזרה לאותו רדיוס, תחת ההנחות של שדה קבוע וללא (10) גרר, לשני הגדלים יש ערכיהם ההתחלתיים. משום שהתנע הזוויתי זהה והרדיוס זהה, המהירות המשיקית היא שוב ωr_0 ; משום שהאנרגיה זהה ועומק בור הכבידה זהה, המהירות הכוללת זהה, ולכן המהירות הרדיאלית היא $-u$: באותו גודל כמו בזריקה, וכעת מופנית מטה. משטח המסתובב באותו קצב נע משיקית באותה מהירות, ולכן התנועות הצידייות של החומר ושל הקרקע מבטלות זו את זו, ונשאר רק הרכיב הרדיאלי. לכן:

$$v_{\text{land}} = u \quad \text{בחזרה לאותו רדיוס.}$$

במילים: חומר שנופל בחזרה לגובה שממנו יצא נוחת במהירות שבה נזרק, יהא הסיבוב אשר יהא. הדבר חשוב משום שהוא קושר את מהירות הנחיתה, ודרכה את ההלם, ישירות למהירות הזריקה בפתח (חלק J), בלי רווח ובלי הפסד מן המעוף.

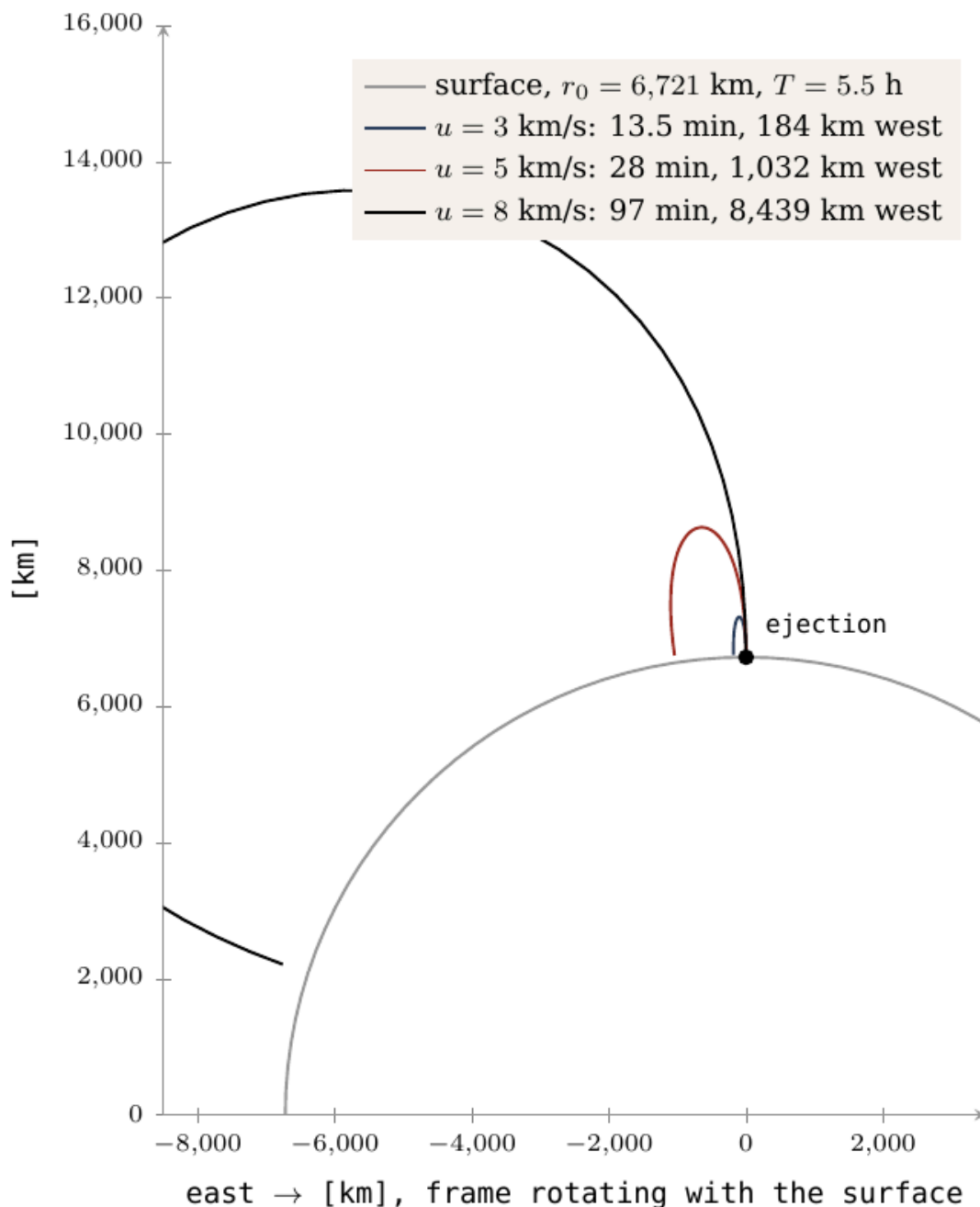
המשוואה מתארת נחיתה ממשית על משטח כדורי רציף במודל. היא אינה קובעת שהחומר נחת על החלק של הקליפה שעתיד לעלות עם הכיפה; קביעה כזו דורשת מפה של הפתחים ושל הקליפה. מרחק הנחיתה שלהלן הוא ההיסט היחסי לאורך קו המשוואה.

הטבלה עוקבת אחר ארבעה מעופים, מ-2 עד 8 ק"מ/ש'. קראו כל שורה מימין לשמאל: לאיזה גובה עלה החומר, כמה זמן היה באוויר, כמה רחוק מערבה מנקודת המוצא שלו ירד, ובאיזו מהירות נחת. העמודה האחרונה חוזרת על הראשונה, וזו משוואה (11). שאר העמודות גדלות הרבה יותר מהר מן המהירות: העלאת המהירות מ-2 ל-5 ק"מ/ש' מגדילה את הגובה המרבי כמעט פי שמונה (מ-251 ל-1,932 ק"מ), וב-8 ק"מ/ש' החומר עולה גבוה יותר מרדיוס גוף האם עצמו (8,684 ק"מ לעומת $r_0 = 6\,721$ ק"מ) ונשאר באוויר יותר משעה וחצי.

u , ק"מ/ש'	גובה מרבי מעל רדיוס הזריקה, ק"מ	זמן החזרה, דקות	היסט מערבה על פני השטח, ק"מ	u_{land} , ק"מ/ש'
2	251	8.46	51.7	2
3	591	13.50	184.1	3
5	1,932	28.01	1,031.6	5
8	8,684	97.28	8,438.7	8

טבלה: מעופי חזרה לאותו רדיוס מקו המשוואה של גוף האם, לארבע מהירויות זריקה.

במערכת האינרציאלית החומר נע בכיוון הסיבוב, אבל פני השטח מתקדמים יותר במהלך המעוף שלו. הסיבה היא התנע הזוויתי. כשהחומר עולה, מרחקו מהמרכז גדל בעוד התנע הזוויתי שלו נשאר קבוע, ולכן הוא מסתובב סביב המרכז לאט יותר מן הקרקע שמתחתיו, שממשיכה להסתובב ב- ω . מחליקה על הקרח שפורשת את זרועותיה מאטה את סיבובה באותו אופן. כשהחומר יורד, הקרקע כבר המשיכה מזרחה, והחומר נוחת ממערב למקום שממנו יצא. ההיסט מערבה הוא תכונה של המעוף, ולא תנועה של הקליפה.



איור 9. מעופי חזרה של חומר שנזרק רדיאלית מקו המשווה, משורטטים במערכת הייחוס המסתובבת עם פני השטח (K.1§; פרמטרים של טבלת הסביבה). כל אחד חוזר לאותו רדיוס במהירות יחסית השווה למהירות הזריקה שלו, ומוסט מערבה משום שפני השטח המשיכו לנוע במהלך המעוף. (בשרטוט: ציר אופקי — "מזרחה ← [ק"מ], מערכת ייחוס המסתובבת עם פני השטח"; ציר אנכי — [ק"מ]; הקשת הגדולה — פני השטח, $r_0 = 6,721$ ק"מ, $T = 5.5$ שעות; הקו הכחול-כהה — $u = 3$ ק"מ/ש': 13.5 דקות, 184 ק"מ מערבה; הקו האדום — $u = 5$ ק"מ/ש': 28 דקות, 1,032 ק"מ מערבה; הקו השחור — $u = 8$ ק"מ/ש': 97 דקות, 8,439 ק"מ מערבה; הנקודה — "זריקה".)

איור 9 מציג את אותם מעופים כפי שהם נראים לצופה העומד על פני השטח המסתובבים. הקשת הגדולה היא פני השטח, והנקודה היא נקודת הזריקה. כל עקומה עולה, מתעקלת מערבה (שמאלה) ונופלת בחזרה אל פני השטח; ככל שהמעוף גבוה וארוך יותר, כך הוא נוחת רחוק יותר מערבה. המעוף של 8 ק"מ/ש', בשחור, עולה הכי גבוה ונוחת יותר מ-8,000 ק"מ מערבה.

החומר הנזרק מן הגוף עצמו. המעופים שלמעלה מתחילים על גוף האם. הגוף, לאחר שעלה, זרק חומר גם מן הפתחים שלו עצמו; המקום שבו החומר הזה נפל בחזרה עליו, והעוצמה שבה נפל, יצרו את ההבדל בין החצי המוביל לחצי המאסף שלו. התיעוד הזה הוא הנושא של חלקים F-I ושל K.4§.

מה שיש בידינו עכשיו: על קליפת גוף האם, מהירות הנחיתה שווה למהירות הזריקה, ונקודת הנחיתה נמצאת ממערב לפתח במרחק שגדל מהר עם המהירות.

K.2 נחיתה על מטרה גבוהה יותר

המקרה הבא הוא חומר שאינו נופל בחזרה לגובה שלו עצמו אלא נוחת על משטח גבוה יותר — מדרון הכיפה העולה, או הגוף המתפתח שמעליה. מטרה כזו מונחת כמסתובבת יחד עם גוף האם (בקורוטציה), ולכן היא נעה הצידה מהר יותר מהקרקע שמתחתיה, ביחס ישר למרחקה מהמרכז. השאלה היא באיזו מהירות החומר פוגש אותה.

במרחק r , המהירות הרדיאלית והמהירות ביחס למטרה המסתובבת יחד עם גוף האם הן:

$$v_r^2 = 2 \left(\mathcal{E} + \frac{K}{r} \right) - \frac{\ell^2}{r^2}, \quad v_{\text{rel}}^2 = v_r^2 + \left(\frac{\ell}{r} - \omega r \right)^2.$$

הביטוי הראשון הוא מאזן האנרגיה בגובה r : האנרגיה הכוללת, ועוד עומק בור הכבידה שם, נותנים את (12) האנרגיה הקינטית הזמינה, ומפחיתים ממנה את החלק הקשור בתנועה הצידית, ℓ^2 / r^2 , כך שנשארת התנועה מעלה-מטה. הביטוי השני מחבר שני רכיבים הניצבים זה לזה: המהירות הרדיאלית, וההפרש בין המהירות הצידית של החומר, ℓ / r , לזו של המטרה, ωr . ב- $r = r_0$ הרכיב השני מתאפס ו- $v_{\text{rel}} = u$, וזו שוב משוואה (11). גבוה יותר, החומר נע הצידה לאט יותר מן המטרה, וההפרש הזה הוא חלק ממהירות הנחיתה: המטרה נסחפת אל החומר מן הצד.

נדרשים $v_r^2 \geq 0$ ומפגש בין מסלול החומר לבין המטרה בזמן ובמקום. הגעה לרדיוס המטרה לבדה אינה נחיתה על גוף קטן או על בליטה: החומר חייב גם להימצא במקום שבו נמצאת המטרה כשהוא מגיע. סף ההגעה הרדיאלי, המתקבל מהצבת $v_r = 0$ ברדיוס המטרה — המהירות שמביאה את החומר בדיוק עד הגובה הזה — הוא:

$$u_{\text{min}}^2 = 2K \left(\frac{1}{r_0} - \frac{1}{r} \right) + \ell^2 \left(\frac{1}{r^2} - \frac{1}{r_0^2} \right).$$

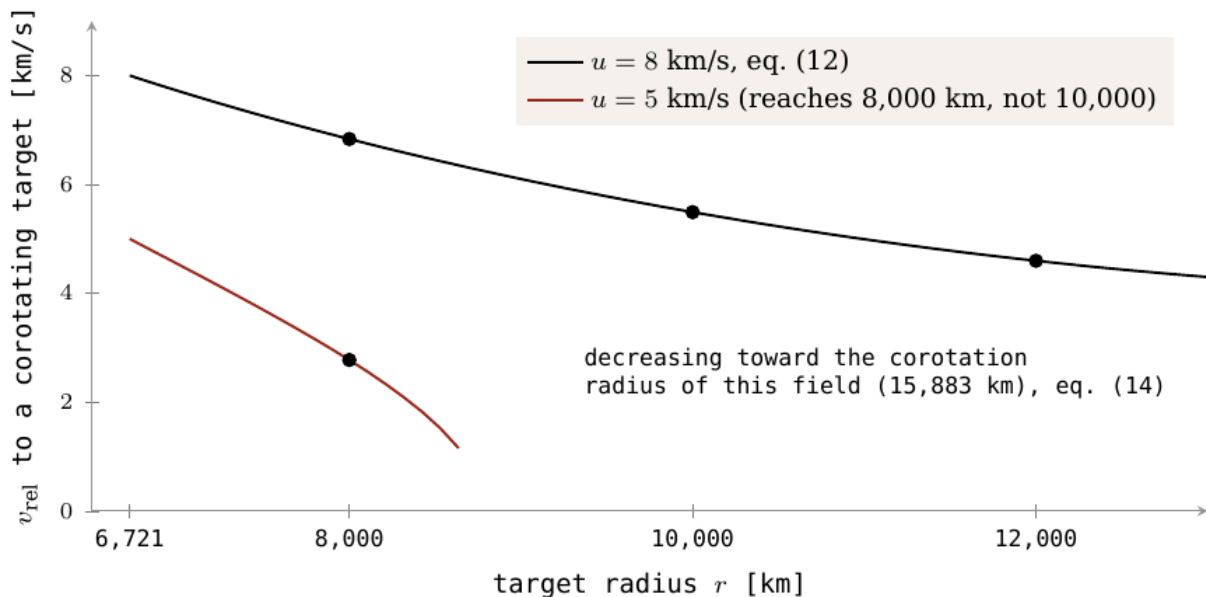
האיבר הראשון הוא מחיר הטיפוס מבור הכבידה מ- r_0 עד r ; השני, שהוא שלילי, הוא העזרה שהחומר מקבל (13) מן התנועה הצידית שהוא נושא מפני השטח המסתובבים.

הטבלה נותנת, לשלושה רדיוסי מטרה, את מהירות הזריקה המזערית הנדרשת כדי להגיע אליהם, ואת מהירות הנחיתה ביחס למטרה לזריקה ב-5 וב-8 ק"מ/ש'. אפשר לקרוא ממנה שני דברים. ראשית, מעוף ב-5 ק"מ/ש' מגיע ל-8,000 ק"מ (שם מספיקים 4.226 ק"מ/ש') אבל לא ל-10,000 ק"מ (שם נדרשים 6.072 ק"מ/ש'). שנית, במעוף ב-8 ק"מ/ש' מהירות הנחיתה יורדת ככל שהמטרה מוצבת גבוה יותר: מ-6.834 ל-5.491 ול-4.597 ק"מ/ש', תמיד מתחת ל-8 ק"מ/ש' של חזרה לאותו גובה.

רדיוס המטרה, ק"מ	u_{min} , ק"מ/ש'	v_{rel} עבור $u = 5$	v_{rel} עבור $u = 8$
8,000	4.226	2.775	6.834
10,000	6.072	אינו מגיע	5.491
12,000	7.050	אינו מגיע	4.597

טבלה: מהירות הזריקה המזערית ומהירות הנחיתה היחסית (ק"מ/ש') לשלושה רדיוסי מטרה המסתובבים יחד עם גוף האם.

הרדיוסים הם משטחי בדיקה; הם אינם חמישה שלבי בנייה מתוארכים ואינם מרחקים של מרכז הירח. עבור מטרה כדורית מפותחת, המרחקים מכדור הארץ אל הצד הקרוב ואל הצד הרחוק שלה שונים מן המרחק בין המרכזים ב- R_b , רדיוס הגוף. בשלב הזה נדרשים גם הכבידה של הגוף המתפתח וצורת החיבור.



איור 10. המהירות ביחס למטרה המסתובבת יחד עם גוף האם כפונקציה של רדיוס המטרה, לשתי מהירויות זריקה (K.2, §K.3§). הירידה עם הגובה תקפה למקור אחד, לסיבוב אחד ולשדה אחד; זהו קשר בין גובה למהירות בדוגמה אחת, ולא מגמה כרונולוגית של הלב. (בשרטוט: ציר אופקי — רדיוס המטרה r בק"מ, עם סימונים ב-6,721, 8,000, 10,000 ו-12,000; ציר אנכי — v_{rel} ביחס למטרה המסתובבת יחד עם גוף האם, בק"מ/ש; הקו השחור — $u = 8$ ק"מ/ש, משוואה (12); הקו האדום — $u = 5$ ק"מ/ש (מגיע ל-8,000 ק"מ, לא ל-10,000); הכיתוב — "יורדת לעבר רדיוס הקורטציה של שדה זה (15,883 ק"מ), משוואה (14)".

איור 10 משרטט את אותו חישוב באופן רציף. הציר האופקי הוא רדיוס המטרה, מרדיוס הזריקה של 6,721 ק"מ והלאה; הציר האנכי הוא מהירות הנחיתה ביחס אליה. שתי העקומות מתחילות במהירות הזריקה שלהן, כפי שמשוואה (11) דורשת, ויורדות ככל שהמטרה מוצבת גבוה יותר. העקומה האדומה, ל-5 ק"מ/ש, מסתיימת במקום שבו המעוף מגיע לגובהו המרבי, 1,932 ק"מ מעל רדיוס הזריקה (K.1§). מעבר לזה החומר אינו מגיע. הנקודות מסמנות את ערכי הטבלה.

K.3 מגמת ההלם מותנית במסלול

איור 10 מזמין קריאה לאורך הזמן: ככל שהמטרה עלתה, הנחיתות נעשו רכות יותר, ולכן ההלם הרשום בדגימות אמור לרדת עם הזמן. סעיף זה קובע מתי הקריאה הזאת תקפה ומתי אינה תקפה.

עבור אותו מקור, מהירות זריקה קבועה, K קבוע ו- ω קבוע, משוואה (12) נותנת:

$$\frac{dv_{rel}^2}{dr} = 2 \left(\omega^2 r - \frac{K}{r^2} \right).$$

המשוואה משווה בין שתי תאוצות ברדיוס r : המשיכה החוצה שחש גוף המסתובב עם גוף האם, $\omega^2 r$, (14) והמשיכה פנימה של הכבידה, K/r^2 . מתחת לרדיוס שבו השתיים שוות, הכבידה גוברת ומהירות הנחיתה יורדת עם הגובה; מעליו, הסיבוב גובר ומהירות הנחיתה עולה. הרדיוס הזה הוא רדיוס הקורטציה — המרחק שבו גוף שמסתובב עם כדור הארץ כבר נע במהירות של מסלול חופשי; כאן: המרחק שבו גוף המסתובב פעם אחת עם גוף האם נמצא במסלול חופשי, ואינו מוחזק מטה בידי הכבידה ואינו מושלך החוצה. המהירות היחסית יורדת עד

רדיוס הקורטציה של המודל, ועולה מעבר לו אם החומר מגיע והמטרה עדיין מסתובבת יחד עם גוף האם. בנתוני השלב המוקדם כאן הרדיוס הזה הוא כ-15,883 ק"מ, משום שהמסה היא M_0 . הוא אינו מחליף את ערך הייחוס של 15,818 ק"מ במאמר 2, המשתמש בהגדרת מסה אחרת. כל רדיוסי המטרה של K.2§ נמצאים הרבה בתוכו, ולכן כל עקומה באיור 10 יורדת.

זהו קשר בין גובה למהירות באותה דוגמה. הפיכתו למגמת הלם לאורך הזמן דורשת כיצד משתנים מהירות הזריקה, הסיבוב, מיקום המטרה, זווית הנחיתה והחומר. בחזרה לאותו גובה מתקבלת משוואה (11). עלייתו של גוף אחר אינה מחייבת מגמה יורדת במהירות החזרה לאותו גובה: חומר שנופל בחזרה אל הקליפה שלו עצמו נוחת במהירות הזריקה שלו, יהא גובהו של גוף שני אשר יהא. מגמת הלם לפי עומק הדגימה דורשת גם זיהוי של שכבות ושל אירועים: קיפול, חפירה ונחיתות חוזרות עלולים לטשטש את הרצף המקורי, כמו ערימת דפים שנטרפה וסודרה מחדש ואינה מראה עוד את הסדר שבו נכתבו. אין כאן ניבוי מחייב של 86 → 102 ג'יגה-פסקל (ירידה בלחץ ההלם — הלחץ בגל ההלם של נחיתה, שמינרלים רושמים), ואין הוכחה שמקור אסטרואידי אינו יכול להראות שינוי לאורך הזמן. הירידה באיור 10 היא תכונה של מסלול אחד; השאלה אם היא הפכה למגמה לאורך הזמן היא עניין לתיעוד, ולא למשוואה הזאת.

K.4 היכן נוחת החומר שהגוף עצמו זורק

סעיפים K.1–K.3 עסקו בחומר שזרק גוף האם. סעיף זה פונה לחומר שזרק הגוף עצמו, ומראה כיצד הוא קובע את דפוס המכתשים לפי קו אורך שחלקים C ו-I-F מודדים.

המעופים של חלקים J–K מתחילים על גוף האם. לאחר שהגוף עלה על החיבור, הפתחים שלו עצמו — הימות שלו — זרקו גם הם חומר, רובו מקרבת קו המשווה שלו. הזריקה הזאת לא הייתה חזקה ולא רחוקה. חומר שנזרק מן הגוף במהירות המילוט שלו עצמו או פחות — כ-2.0 ק"מ/ש' בצפיפות 1,300 ק"ג/מ"ק ו-2.3 ק"מ/ש' בשחרור — נופל בחזרה עליו, וסיבובו של הגוף המחובר קובע היכן הוא נופל ובאיזו עוצמה. (מהירות המילוט היא המהירות שבה חומר עוזב גוף לתמיד; מתחתיה, הכבידה של הגוף מחזירה את החומר. המהירויות האלה קטנות פי כמה מן המעופים של 5–8 ק"מ/ש' ב-K.1§, ולכן החומר שהגוף זרק נשאר קרוב לבית.)

הסדרה הולכת לפי המוסכמה המקובלת: החצי המוביל של הירח, החצי הפונה אל תנועתו במסלול, ממורכז ב-90° מערב; החצי המאסף — ב-90° מזרח. המוסכמה נשענת על סיבוב סינכרוני: הירח מסתובב פעם אחת סביב צירו בזמן שהוא מקיף את כדור הארץ פעם אחת, ולכן אותו פן פונה תמיד אל כדור הארץ (הצד הקרוב, שמרכזו ב-0°), הפן הנגדי פונה תמיד הרחק ממנו (הצד הרחוק, 180°), קצה אחד של הדיסקה (limb) פונה תמיד קדימה לאורך המסלול, והקצה האחר פונה תמיד אחורה. הגוף המחובר הסתובב באותו אופן, כשהוא נישא סביב יחד עם כדור הארץ, והיו לו אותם ארבעה פנים.

הגוף הסתובב עם כדור הארץ. חומר שנזרק מעלה מן החצי המאסף יורד בזמן שהחצי הזה מתרחק ממנו: הוא משיג את הקרקע מאחור, ונוחת ברכות. חומר שנזרק מעלה מן החצי המוביל יורד בזמן שהחצי הזה ממשיך ונכנס בו: הקרקע נתקלת בחומר הנופל, והנחיתה קשה. ההבדל טמון במהירות הנחיתה, שהיא תמיד מהירות החומר ביחס לקרקע שהוא פוגש. כשהקרקע מתרחקת מן החומר הנופל, תנועת הקרקע מופחתת מן המהירות הזאת; כשהקרקע נעה לקראתו, השתיים מתחברות. כדור שנתפס כשהיד נסוגה נוחת בה ברכות; אותו כדור, כשהוא נתפס בזמן שהיד נדחפת קדימה, מכה בה. חומר שנזרק מן הצד הרחוק מפגר מעט אחרי הסיבוב ונסחף לעבר 90° מזרח — הפיגור מערבה של K.1§, שמ-180° מצביע לעבר החצי המאסף:

נזרק מ-	מה מחזיר אותו	נוחת	נחיתה
180°, הצד הרחוק, קרוב לקו המשווה	הכבידה; הוא מפגר מעט אחרי הסיבוב	170° מזרח אם קרוב, 100° מזרח אם רחוק	הקשה ביותר (I.1§)

90° מזרח, החצי המאסף	הכבידה בלבד; הגוף מתרחק ממנו	בחזרה על 90° מזרח	רכה
90° מערב, החצי המוביל	הכבידה, והגוף הממשיך לנוע לקראתו	בחזרה על 90° מערב	קשה

טבלה: היכן נוחת החומר שהגוף זורק, ובאיזו עוצמה, לפי מקום הזריקה.

הטבלה נקראת שורה אחר שורה: מאין נזרק החומר, מה מחזיר אותו, היכן הוא נוחת, ובאיזו עוצמה. צבעיה הולכים לפי צבעי הספירה ב-C.3§: כתום לחצי המאסף, שבו החומר נוחת ברכות והמכתשים מתקבצים, וירוק לחצי המוביל, שבו הוא נוחת בעוצמה. חומר מן הצד הרחוק שנשאר סמוך לגוף נוחת קרוב למקורו (כ-170° מזרח); חומר שמגיע רחוק יותר נסחף עד 100° מזרח, קרוב למרכז החצי המאסף. הנחיתה שלו היא הקשה מבין השלוש, מן הסיבה המובאת להלן.

מכאן נובעים שני ניבויים. החצי המאסף אוסף את החומר שהוא עצמו זרק ואת החומר הנסחף מן הצד הרחוק, ולכן מחזיק את מירב המכתשים (C.3§). החצי המוביל פוגש את החומר שזרק חזיתית, ולכן הוא החצי שעליו נחת החומר בעוצמה הרבה ביותר: המכתשים שלו אמורים לשאת את סימני הנחיתה הקשה (F.1–L.4§). הנחיתות על הצד הרחוק היו קשות עוד יותר, הקשות מכולן: הן נעשו בזמן שהגוף היה מחובר, תחת המשיכה המשולבת של הירח ושל כדור הארץ (G.2, §1.1§). הצד הקרוב עומד בנפרד משניהם: הוא שוכן ליד הימות הגדולים, והמכתשים שלו עוצבו גם מלמטה בידיהם (G.1§).

הניבוי הראשון נבדק בספירה ב-C.3§. במילים פשוטות, המבחן שואל אם העודף ב-90° מזרח יכול להיות מקרה של ספירה: ספירת מכתשים מתפזרת בערך כשורש הריבועי שלה, ולכן שני אזורים יכולים להיבדל זה מזה במקרה בלבד. היחס בין צפיפות החצי המאסף לצפיפות החצי המוביל שם הוא 1.79, והטווח שבו הוא נמצא ברמת ביטחון של 95%, 1.56–2.05, נשאר הרבה מעל אחד, הערך שמשמעו אין הבדל; דגימה חוזרת של תאים שלמים במפה במקום של מכתשים בודדים, כדי להביא בחשבון מכתשים המתקבצים יחד, נותנת את אותה תשובה. הניבוי השני נבדק בצורת המכתשים בחלקים F–I. מה שיש בידינו עכשיו הוא הגאומטריה שמאחורי שניהם: נחיתות רכות וצפיפות מאחור, נחיתות קשות מלפנים.

חלק L — הכימיה

הבעיה

החומר של מכתש מספר מאין הוא בא. **הגישה:** ברזל, טיטניום ותוריום נקראים סביב הימות ובתוך המכתשים, והמסה הזרה שקריאת הספרות דורשת נמדדת מול מה שהקרום מכיל בפועל.

חלקים C עד K קראו את המכתשים לפי מספרם, מקומם וצורתם. חלק זה קורא ממה הם עשויים. צורתו של מכתש מתעדת כיצד נחת החומר החוזר; הכימיה שלו מתעדת מאין בא החומר הזה. ארבע שאלות נשאלות בזו אחר זו. האם החומר שסביב כל ים בא מאותו ים (L.1–L.3§)? האם פנים המכתש הוא חומר אחד, או שכבות שנחפרו מלמטה (L.4§)? האם גוף מבחוץ השאיר את המסה שלו במכתשים, כפי שקריאת ההתנגשות של הספרות דורשת (L.5§)? וממה היה עשוי החומר שהמשיך להגיע מכדור הארץ אחרי השחרור, והיכן נפל (L.6–L.7)? הכימיה של רצפות המכתשים הגדולים שעל הבזלת נקראת יחד עם הרצפות עצמן, ב-G.3§: הרצפות שקפאו גבוה התרוממו כשהיו עדיין עשירות בחומרים נדיפים, שנשאו עמם את החומר הקל כלפי מעלה, והן דלות יותר בברזל מן הרצפות ששקעו בחזרה לגובה הקרקע ושקעו בהן החומרים הכבדים.

כל סוג של יסוד עונה על שאלה אחרת מן השאלות האלה:

יסוד	מה הוא מסמן	מה הוא מספר כאן
ברזל וטיטניום (FeO, TiO ₂)	את החומר של הימות, שעשיר בשניהם	עד כמה רחוק זרק כל ים את החומר שלו, והאם המכתשים נושאים אותו (L.1, §L.2, §L.4, §L.6§)
תוריום	יסוד שנשאר בנוזל האחרון של התכה מתקררת ועולה יחד עם חומר עמוק	ההילה של ים, הנקראת בקנה מידה גס (L.3§)
יסודות אוהבי ברזל (סידרופיליים)	מתכת, שנושאת אותם; גוף מבחוץ מביא אותם	האם גוף זר השאיר את המסה שלו במכתשים (L.5§)
איזוטופים של רותניום	את האזור במערכת השמש שבו נוצר החומר	של מי היסודות אוהבי הברזל שהמכתשים נושאים: של גוף זר או של כדור הארץ (L.5§)

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), כלומר גרמים בטונה. שלוש מפות מן המסלול משמשות לאורך כל החלק. ה-Kaguya Multiband Imager [S10], מצלמה על הלוויין היפני Kaguya, מדד את האור המוחזר מפני השטח בכמה צבעים, ומהם מחושבים הברזל והטיטניום בכ-240 מ' לפיקסל. Lunar Prospector, לוויין של NASA, ספר את קרני הגמא שפולט התוריום; המפה שלו מוחלקת על פני כ-60 ק"מ. מפת הימות של LROC היא קו המתאר של כל יחידת בזלת שמופתה על ידי המצלמה של Lunar Reconnaissance Orbiter; היא משמשת להסרת הבזלת מן המדידה בכל מקום שבו יש לקרוא את הקרקע ולא את הים.

L.1 חומר הים בטבעות סביב הים

סעיף זה מבצע את מבחן המקור שנוסח ב-C.58. המודל גורס שהימות הם הפתחים שמהם נזרק החומר החוזר (C.18): רוב המכתשים שליד ים נוצרו על ידי אותו ים. אם כך, מה שים זרק צריך להימצא על הקרקע שסביבו, הרבה בקרבתו ופחות הרחק ממנו, כפי שהאפר של ארובה מונח בשכבה העבה ביותר ליד הארובה. הספרות גורסת במקום זאת שהמכתשים נחפרו על ידי גופים מבחוץ, שאין להם קשר לימות; לפי קריאה זו הקרקע שליד ים מועשרת רק במקום שבו מכתשים מאוחרים יותר ערבבו מעט מן הים הצידה אל תוכה, למרחק של קילומטרים אחדים עד כמה עשרות קילומטרים [S26]. שתי הקריאות נפרדות אפוא בטווח: ים שזרק את החומר שלו מגיע רחוק; ערבוב צידי אינו מגיע רחוק.

הקרקע נקראת בטבעות: רצועות במרחק קבוע משפת הים, 0–25 ק"מ, 25–50 ק"מ, וכך הלאה עד 300–600 ק"מ. בכל טבעת נבחרו מכתשים של 5–60 ק"מ, והקרקע שסביב כל מכתש נקראה במרחק של 3–4 רדיוסי מכתש ממרכזו. מרחק זה נמצא מעבר לשמיכת הפליטה של המכתש עצמו — החומר שהוא זרק החוצה — שמגיעה עד כ-2 רדיוסים; לכן מה שנקרא הוא הקרקע שעליה נחת המכתש. כל פיקסל של בזלת ממופה מוסר, כך שמה שנמדד הוא היבשה שסביב הים ולא לבה שהתפשטה מעליה. קבוצות הביקורת הן מכתשים באותם גדלים שנמצאים במרחק של יותר מ-600 ק"מ מכל ים: הקרקע שלהם היא הרמה של הרמות במקום שאליו לא הגיע שום ים.

התוצאה העיקרית: חומר הים בטבעות סביב הים. עיקרו של המבחן הוא הקרקע שסביב כל ים, הנקראת טבעת אחר טבעת כלפי חוץ. אם הים זרק את החומר שלו סביבו, היסודות הכבדים של הים — ברזל וטיטניום — חייבים להימצא בטבעת סביבו, ובכמות קטנה יותר ככל שהטבעת רחוקה יותר. והם אכן נמצאים. סביב ששת הימות במאוחד, הברזל של הקרקע (3–4 רדיוסי מכתש, בזלת מוסרת) יורד מ-6.9 wt% ב-0–25 ק"מ ל-3.1 ב-100–150 ק"מ, ואז נשאר על 3.3–3.4 עד 600 ק"מ, 1.1 wt% מעל קבוצות הביקורת; הטיטניום יורד מ-0.90 ל-0.51, לעומת 0.46 בקבוצות הביקורת (הטבלה, איור 11). במספרים פשוטים: הקרקע שליד ים מכילה פי שלושה ברזל מן הרמות הרחוקות (6.9 לעומת 2.3), וגם במרחק 300–600 ק"מ היא עדיין מכילה בערך פי אחד וחצי. סביב Smythii ו-Moscoviense הברזל יורד בחצי בתוך 50–100 ק"מ; סביב Crisium הוא נשאר קרוב ל-4 wt% עד 300 ק"מ. שני היוצאים מן הכלל הם בברזל בלבד, והם רחוקים מן הים: מעבר ל-150 ק"מ הקרקע שמדרום-מערב ל-Nectaris עולה שוב, לעבר הרמות הדרומיות העשירות בברזל של הצד הקרוב, בעוד הטיטניום שלה נשאר שטוח; Moscoviense, בצד הרחוק, הוא ים קטן שהטבעת שלו מגיעה לרמה של הצד הרחוק, 2 wt%, בתוך 100 ק"מ. בשני היוצאים מן הכלל הטיטניום, או הברזל הקרוב לים, עדיין יורד כצפוי; מה שחורג הוא הטבעת הרחוקה, שבה לקרקע שמעבר לטווח הים יש רמה משלה. המישורים נקראים בנפרד. במודל מישור — Procellarum, Tranquillitatis, Fecunditatis — אינו פתח מעל כיפת הזנה אלא קרום שהותך במקומו (מאמר 5, C.28); לא היה לו גרון, והוא לא זרק דבר ולא שפך דבר. הימות — מלבד ימות המגע — הן ששפכו את ההתכה שלהן מעבר לשוליהן, נוסף על כך שזרקו חומר גדול. סביב Procellarum, הגדול שבמישורים, הברזל יורד מ-10.9 ל-2.4 wt%, רמת קבוצות הביקורת, ב-300–600 ק"מ — טווח קצר, לא הטווח של זריקה; Tranquillitatis ו-Fecunditatis שוכנים בין בזלות אחרות ונשארים גבוהים.

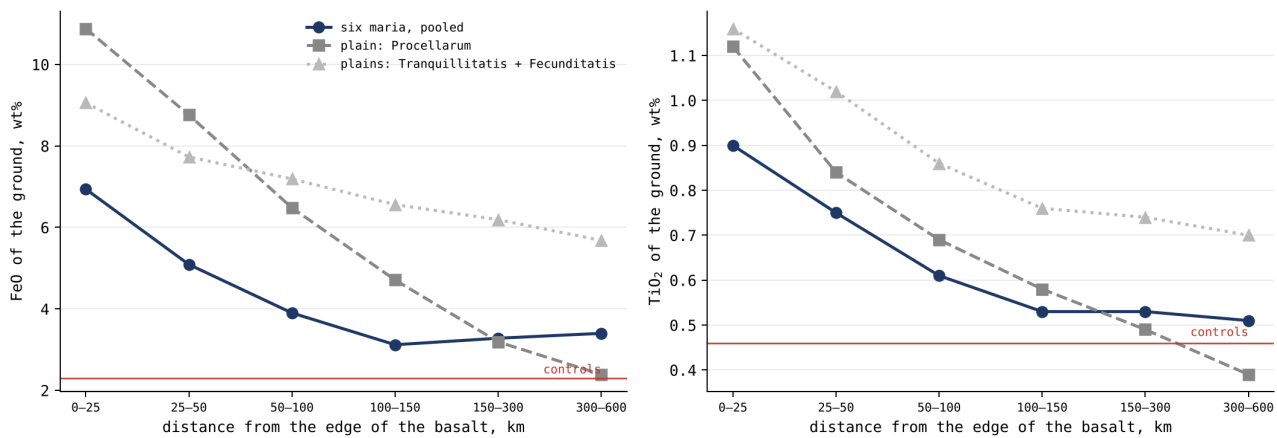
מדוע הברזל גבוה ביותר בשפה. ים נאטם — פני השטח שלו קפאו ושמרו על ההרכב שהיה להם אז — בריכוז שהגיע אליו בסוף, כ-17 wt% FeO. הקרקע שסביבו נאטמה מוקדם יותר, כשהים היה דל יותר. בשלב הראשון החומר המעורב של הים זרם החוצה למרחקים ארוכים: חומר קל וחומרים נדיפים נוטים לצוף, ובהיותם נוזליים יותר הם זרמו רחוק. ככל שהחומר הקל עזב, הים התרכז בברזל והצמיגות שלו — ההתנגדות שלו לזרימה, התכונה שבגללה דבש איטי יותר ממים — עלתה, ומה שהוא זרק עבר מרחקים קצרים יותר. רוטב שמצטמצם על הכיריים מתנהג באותו אופן: כל עוד הוא דליל הוא מתז רחוק מן הסיר; כשהוא מסמיך, מה שעוזב אותו נופל ליד הסיר. לכן הקרקע הרחוקה מן הים נאטמה דלה בברזל, והקרקע הקרובה אליו — עשירה. אותה היסטוריה מתארכת את המכתשים ואת הימות: ליד ים, מכתשים ישנים נושאים פחות ברזל ממכתשים חדשים — אף שרוב

המכתשים החדשים קטנים, נוצרו על ידי חומרים נדיפים ונושאים את החומר הקל יותר — וים עשיר בברזל התרכז זמן רב יותר ונאטם מאוחר, ואילו ים דל בברזל נאטם מוקדם, בלי מנגנון ריכוז חזק.

הקרקע סביב המכתש, FeO/TiO_2 (wt%)						
25–0 ק"מ	50–25	100–50	150–100	300–150	600–300	
הימות						
7.8/1.25	5.8/0.92	3.6/0.72	3.2/0.64	3.4/0.57	3.5/0.62	Smythii
10.8/1.07	9.8/0.97	9.6/0.78	—	—	—	Imbrium
8.0/1.31	7.0/0.67	6.7/0.68	—	—	—	Serenitatis
4.7/0.72	4.1/0.60	4.2/0.53	4.0/0.49	4.4/0.43	3.4/0.43	Crisium
7.3/1.00	3.2/0.61	2.4/0.48	1.9/0.47	2.1/0.48	2.3/0.46	Moscoviense
5.2/0.84	4.6/0.79	4.1/0.72	4.1/0.65	4.5/0.65	6.0/0.67	Nectaris
6.9/0.90	5.1/0.75	3.9/0.61	3.1/0.53	3.3/0.53	3.4/0.51	ששת הימות במאוחד
המישורים						
8.6/1.24	7.7/1.12	6.8/1.03	5.8/0.84	5.0/0.81	4.5/0.78	Tranquillitatis
9.4/1.12	7.9/0.93	7.3/0.83	6.8/0.74	6.4/0.73	6.3/0.64	Fecunditatis
10.9/1.12	8.8/0.84	6.5/0.69	4.7/0.58	3.2/0.49	2.4/0.39	Procellarum

חציונים של הקרקע במרחק 3–4 רדיוסי מכתש, כשפיקסלי הים הממופים מוסרים, למכתשי מטרה של 5–60 ק"מ שמשייכים לים הקרוב אליהם; טבעות עם פחות מ-10 מכתשים נשארו ריקות. קבוצות ביקורת רחוקות (יותר מ-600 ק"מ מכל ים): 2.3/0.46. הצבע דוהה עם המרחק.

כל תא נותן ברזל וטיטניום, FeO/TiO_2 , בטבעת של העמודה שלו. הטבלה נקראת לאורך כל שורה, מן הטבעת הקרובה ועד הרחוקה ביותר; הכתום דוהה ככל שהמרחק גדל, ובשורות של הימות הערכים דועכים יחד איתו. השורה המודגשת, ששת הימות במאוחד, היא התוצאה העיקרית, ויש לקרוא אותה מול קבוצות הביקורת שבהערה שמתחת לטבלה, 2.3/0.46. המישורים נשארו בלי צבע משום שהם נקראים בנפרד: Procellarum הוא המישור שיורד עד רמת קבוצות הביקורת. המקפים מסמנים את הטבעות הרחוקות סביב Imbrium ו-Serenitatis, שיש בהן מעט מדי מכתשים כדי לקרוא אותן, משום שהקרקע שם נמצאת בין בזלות אחרות.



איור 11. חומר הים בטבעות: הברזל והטיטניום של הקרקע סביב המכתשים מול המרחק מן השפה, סביב ששת הימות ושלושת המישורים, כשהבזלת מוסרת; קבוצות הביקורת הרחוקות לשם השוואה (מאמר 5, J.1§).

איור 11 משרטט את אותם ערכים כעקומות מול המרחק. העקומות של הימות יורדות בתלילות על פני 100 הק"מ הראשונים ואחר כך מתיישרות מעל רמת קבוצות הביקורת; העקומה של Procellarum ממשיכה לרדת עד שהיא פוגשת אותה. החלק הישר של עקומות הימות, מעל קבוצות הביקורת עד 600 ק"מ, הוא הטווח שערוב צידי על ידי מכתשים מאוחרים יותר אינו יכול לספק.

שתי קריאות נובעות מכך. **סביב כל ים הקרקע נושאת את הברזל של הים**, הדועך עם המרחק: הקרקע שבתוך 50 ק"מ מים מכילה פי שניים וחצי ברזל מקבוצות הביקורת הרחוקות, ועודף נשאר עד 600 ק"מ. זהו הקריטריון של O.1§, והוא מתקיים: המכתשים שליד ים נושאים יותר מן החתימה שלו מאשר מכתשים רחוקים ממנו. זה מה שהמודל מצפה מימות שזרקו את החומר שלהם סביבם. **והמכתש דל יותר מן הסביבה שלו עצמו** — במעט, אבל בכל מרחק ובאותו כיוון: -0.26, -0.10, -0.05, -0.13 wt% FeO מן הטבעת הקרובה ועד הרחוקה, לעומת -0.01 בקבוצות הביקורת, רחוק מכל ים. ארבעת הערכים האלה הם פנים המכתש פחות הקרקע שלו עצמו, בארבע רצועות המרחק של הטבלה של C.5§ (0-50, 50-150, 150-300 ו-300-600 ק"מ). ההבדל קטן, אבל הסימן שלו הוא העיקר: ליד ים המכתש תמיד מעט דל יותר מן הקרקע שהוא יושב בה, ורחוק מכל ים — לא. מה ההבדל הזה מודד, וכיצד המודל קורא אותו — זה הנושא של L.2§.

עד כאן: הקרקע סביב כל ים נושאת את הברזל והטיטניום של הים, הרבה בקרבתו ועודף עד 600 ק"מ; ולצד המישורים, שלא זרקו ולא שפכו דבר, הברזל יורד לרמת הביקורת בתוך כמה מאות קילומטרים.

STUDY 2 מחקר 2

שלב 1 • הגדרת שאלת המחקר והבעיה

התופעה. הקרקע שסביב ים כהה יותר ועשירה יותר בברזל מן הרמות הרחוקות ממנו. **הפער בידע.** הספרות מסבירה את ההילה כחומר ים שעורבב הצידה אל תוך הרמות על ידי מכתשים מאוחרים יותר; המודל אומר שהים זרק את החומר שלו על הקרקע שסביבו, והחומר הזה יצר את המכתשים שם (C.1, §C.5). אם הים הוא המקור, החתימה שלו חייבת לדעוך עם המרחק ממנו, סביב כל ים, והמכתשים שבקרבתו חייבים לשאת את החתימה הזו. **שאלת המחקר:** האם הברזל, הטיטניום והתוריום של הקרקע ושל המכתשים סביב ים דועכים עם המרחק ממנו, סביב כל ים, ועד כמה רחוק מגיעה החתימה של הים?

שלב 2 • סקירת ספרות (רקע מדעי)

מפלים בהרכב לרוחב המגע בין ים לרמות ידועים מספקטרים שנמדדו מן המסלול, והם נקראים כהעברה ציידית על ידי מכתשים מאוחרים יותר, שנושאת חומר ים קילומטרים אחדים עד כמה עשרות קילומטרים אל תוך הרמות [S26]. לפי קריאה זו כל מכתש מאוחר זורק מעט מן הים למרחק קצר, וזריקות רבות כאלה מפזרות אותו; הטווח

נקבע לפי המרחק שמכתש זורק אליו, והוא קצר. ברזל וטיטניום נקראים מן ה-Kaguya Multiband Imager [S10], ותוריום מ-Lunar Prospector. **מה חדש כאן:** מכתשים סביב שישה ימות ושלושה מישורים נבחרים לפני שנקראת כימיה כלשהי, כשהימות הם הפתחים מעל כיפות הזנה של מאמר 5; הקרקע נקראת טבעת אחר טבעת עד 600 ק"מ; וקבוצות ביקורת מותאמות, רחוקות מכל ים, נותנות את קו הבסיס.

שלב 3 · ניסוח השערת המחקר

סביב כל ים הברזל והטיטניום של הקרקע גבוהים ביותר ליד הים ויורדים כלפי חוץ, מעבר לכמה עשרות הקילומטרים שערבוב צידי מסביר; המכתשים שבטווח הים נושאים את החתימה שלו, והרחוקים אינם נושאים אותה. מישור לא זרק דבר ולא שפך דבר, ולכן העודף שליד מישור יורד לרמת קבוצות הביקורת בתוך כמה מאות קילומטרים; הימות, מלבד ימות המגע, שפכו את ההתכה שלהן מעבר לשוליהן נוסף על כך שזרקו חומר גדול.

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 (Crisium, Imbrium, Moscoviense, Nectaris, Serenitatis, Smythii) ו-5,734 סביב שלושה מישורים (Procellarum, Tranquillitatis, Fecunditatis); **הביקורת:** 5,922 מכתשים מותאמים בגודל, במרחק של יותר מ-600 ק"מ מכל בזלת. התאמה בגודל פירושה שקבוצת הביקורת מכילה מכתשים באותם גדלים ובאותם יחסים, כך שהבדל כלשהו אינו יכול לנבוע מהשוואה של מכתשים גדולים עם קטנים. **הכלים:** מפות הברזל והטיטניום של Kaguya ברזולוציה מלאה, מפת התוריום של Lunar Prospector, מפת הימות של LROC, וקוד שקורא כל מכתש ואת הקרקע שלו טבעת אחר טבעת.

בחירה	למה, במילים פשוטות
המכתשים נבחרו לפני שנקראה הכימיה	כדי שהתוצאה לא תוכל להכווין אילו מכתשים נספרים
הקרקע נקראה ב-3–4 רדיוסי מכתש, כשפיקסלי הים מוסרים	כדי לקרוא את הקרקע שעליה נחת המכתש, ולא את הים עצמו
טבעות של מרחק משפת הים	מקור משאיר את סימנו החזק ביותר בקרבתו, וחלש יותר הרחק ממנו
קבוצות ביקורת רחוקות מכל ים	כדי לדעת את רמת הקרקע שאליה לא הגיע שום ים

שלב 5 · איסוף הנתונים (ביצוע המחקר)

רשימת המכתשים וקבוצות הביקורת נקבעה ונשמרה לפני שנפתחה מפה כלשהי. אחר כך כל מכתש נקרא בטבעות שלו, וכן הקרקע שסביבו מחוץ לים; הערכים הם הטבלאות של C.58 ושל סעיף זה.

שלב 6 · ניתוח הנתונים ועיבודם

הדעיכה. בשישה הימות במאוחד, הברזל של הקרקע יורד מ-6.9 wt% ב-0–25 ק"מ ל-5.1, 3.9 ו-3.1 ב-100–150 ק"מ, ונשאר על 3.3 ו-3.4 ב-150–300 וב-300–600 ק"מ, 1.1 wt% מעל קבוצות הביקורת; הטיטניום יורד מ-0.90 ל-0.51, לעומת 0.46. **המכתשים.** בתוך המכתשים הברזל עוקב אחר הקרקע טבעת אחר טבעת, מ-5.88 עד 3.30 wt%, וכל מכתש מעט דל יותר מן הקרקע שלו (0.26 wt% בתוך 50 ק"מ, רווח 95% מ-0.34 עד -0.19; -0.01 בקבוצות הביקורת). רווח 95% הוא הטווח שבו נמצא הערך האמיתי ברמת ביטחון של 95%, בהינתן הפיזור של המכתשים שנמדדו; כאן הוא כולו מתחת לאפס, ולכן העובדה שהמכתש דל מן הקרקע שלו אינה מקריות של המדגם. **תוריום.** חומר הפליטה סביב הימות נושא 2.16 ppm בתוך 50 ק"מ ו-1.39 ב-300–600 ק"מ, לעומת 1.02 בקבוצות הביקורת. **המישורים.** סביב Procellarum הברזל יורד ל-2.4 wt%, רמת קבוצות הביקורת, ב-300–600 ק"מ; סביב שלושת המישורים במאוחד — ל-2.60, בעוד שסביב הימות הוא עדיין על 3.40.

שלב 7 · הסקת מסקנות וכתובת הדוח

תוצאה. ההשערה נתמכת: סביב כל ים החתימה שלו גבוהה ביותר בקרבתו ויורדת כלפי חוץ, והיא מגיעה למאות קילומטרים, רחוק מדי לערבוב צידי בלבד; הימות הם המקור של החומר שסביבם. עודף שנשמר עד 600 ק"מ הוא פי עשרה ויותר מן הטווח של ערבוב צידי על ידי מכתשים מאוחרים. ליד המישורים, שלא זרקו ולא שפכו דבר, העודף יורד לרמת קבוצות הביקורת. **מגבלות.** הטבעות של ימות ומישורים שכנים חופפות במרחקים גדולים, ולכן הטבעות הרחוקות אינן נקיות, ושני המישורים הקטנים יותר שוכנים בין בזלות אחרות; מפת התוריום גסה, כ-60 ק"מ, וקוראת את האזור ולא את המכתש הבודד; שני יוצאים מן הכלל בברזל (מדרום-מערב ל-Nectaris וסביב Moscoviense) מוסברים על ידי הקרקע שמעבר, אך לא נבדקו. **כיווני מחקר המשך.** אותו מבחן עם מפת תוריום ברזולוציה גבוהה יותר, ומודל של המרחק שאליו אמור ליפול חומר שנזרק מים, מול הטווח שנמדד.

L.2 המכתש והקרקע שסביבו

L.1§ מצא שהקרקע שליד ים נושאת את הברזל של הים, ושהמכתש היושב בקרקע הזו מעט דל ממנה. סעיף זה מציג מה נמדד, מה המדידה מראה, וכיצד המודל קורא אותה.

מה נמדד. ה-Kaguya Multiband Imager קורא את האור המוחזר משכבת פני השטח העליונה, ונותן ממנו ריכוז: משקל ה-FeO בכל 100 גרם של השכבה הזו (wt%). הוא אינו נותן כמות של חומר, וגם לא את העומק שאליו החומר מגיע. פנים המכתש והקרקע שב-3–4 רדיוסי מכתש נקראים על אותן מפות, באותה רזולוציה ובאותה יחידה, מכתש אחר מכתש, כל מכתש מול הקרקע שלו עצמו. ההשוואה היא אפוא של שווה מול שווה: שני ריכוזים של אותה שכבת פני שטח, אחד בתוך המכתש ואחד על הקרקע שסביבו.

מה היא מראה. סביב ששת הימות פנים המכתש דל מעט בברזל מן הקרקע שלו עצמו בכל רצועת מרחק: $-0.26, -0.10, -0.05, -0.13$ wt% FeO ב-0–50, 50–150, 150–300 ו-300–600 ק"מ (C.5§). בתוך 50 ק"מ רווח ה-95%, מ-0.34 עד -0.19, נמצא כולו מתחת לאפס. בקבוצות הביקורת הרחוקות, יותר מ-600 ק"מ מכל ים, ההבדל הוא -0.01. ההבדל קטן — עשיריות אחוז מול 5.96 wt% של הקרקע בתוך 50 ק"מ — והסימן שלו הוא העיקר: ליד ים המכתש מעט דל מן הקרקע שלו, ורחוק מכל ים — לא. הוא אינו משנה את התוצאה העיקרית של L.1§, דעיכת החתימה של הים עם המרחק: בתוך המכתשים הברזל עוקב אחר הקרקע טבעת אחר טבעת, מ-5.88 עד 3.30 wt%, והצעד הקטן בין המכתש לקרקע רוכב על הדעיכה הזו בלי לשנות אותה.

כיצד המודל קורא זאת. אנו מציעים שההבדל שייך לאותה היסטוריה כמו הדעיכה (L.1§), מדוע הברזל גבוה ביותר (בשפה). הקרקע שסביב ים נאטמה צעד אחר צעד בזמן שהים התרכז בברזל, ולכן מה שפני שטח מחזיקים תלוי במועד שבו נאטמו. ליד ים, מכתשים ישנים נושאים פחות ברזל ממכתשים חדשים, אף שרוב המכתשים החדשים קטנים, נוצרו על ידי חומרים נדיפים ונושאים את החומר הקל יותר. רצפת המכתש היא הקרקע שעליה נחת החומר — השכבות שלה — ופנים המכתש רושם את החומר ואת השכבה של זמנו שלו. קריאה זו תיבדק כך: המכתשים שליד כל ים יחולקו לפי מחלקות גיל, וההבדל מן הקרקע ישווה מחלקה אחר מחלקה: המכתשים הישנים אמורים לשאת את החומר הגדול יותר.

L.3 התוריום והחומר החוזר

התוריום והחומר החוזר. התוריום הוא היסוד השלישי של מבחן המקור. הוא אינו נכנס לגבישים של המינרלים הנפוצים, ולכן הוא נשאר בנוזל האחרון של התכה מתקררת, ובסדרה הוא מסמן את המגע עם כדור הארץ, במקום שבו הירח נגע בו לאחרונה (מאמר 5, J.3§). סביב הימות גם התוריום של חומר הפליטה יורד עם המרחק, מ-2.16 ppm בתוך 50 ק"מ ל-1.39 ב-300–600 ק"מ, לעומת 1.02 בקבוצות הביקורת (מחקר 2). אבל התוריום הוא ערך אזורי: המפה של Lunar Prospector מוחלקת על פני כ-60 ק"מ, יותר מכל מכתש שנמדד, ולכן

היא מראה את ההילה של הים אך אינה מפרידה בין מכתש לסביבתו. מכתש של 20 ק"מ על המפה הזו הוא כמו פנים בתצלום שצולם מחוץ למיקוד: הצבע של הסצנה נראה, אבל הפנים לא. החלק של החומר החוזר עצמו אינו ניתן לזיהוי מן המפות האלה. הצעד הבא נקבע במאמר 12 (נושאי מחקר): מדד שרואה את החומר החוזר — התכה וזכוכית במכתש, פנים המכתש הנקרא אזור אזור, או תוריום ברזולוציה גבוהה יותר — במקום הקרקע.

L.4 פנים המכתש

L.2§ השווה את המכתש עם הקרקע שסביבו. סעיף זה מביט אל תוך המכתש עצמו. השאלה שהוא עונה עליה היא מה ממלא מכתש: בספרות, מכתש הוא בור שנחפר דרך שכבות, והפסגה והקירות שלו חושפים את העמוקות שבהן; במודל, מכתש הוא המקום שבו נחת חומר חוזר, והוא מלא בחומר הזה. שתי הקריאות חוזות דברים שונים לגבי הפנים. אם המכתש הוא בור דרך שכבות, המרכז, הקירות והשפה שלו צריכים להיות שונים זה מזה ומפני השטח שסביבו. אם הוא מלא בחומר שיצר אותו, המפוזר בתוכו, הפנים צריך להיות חומר אחד.

הכימיה בתוך מכתש מראה מה ממלא אותו. המכתשים של 10–60 ק"מ שבתוך 150 ק"מ משפת ים, 7,227 מהם, נבחרו והוקפאו לפני שנקראה כימיה כלשהי, וכל אחד מהם חולק לשש טבעות: המרכז (עד 0.3 מן הרדיוס), הרצפה (0.3–0.7), הקיר הפנימי (0.7–0.95), השפה (0.95–1.1), חומר הפליטה (1.2–2 רדיוסים) והסביבה (3–4 רדיוסים), כשפיקסלי הים מוסרים משתי האחרונות. ברזל וטיטניום נקראו בכל טבעת על מפות ה-[Kaguya Multiband Imager S10] ברזולוציה המלאה שלהן, כ-240 מ':

הפרש (%wt)	FeO	TiO ₂
מרכז פחות קיר פנימי	+0.08 (0.06–0.10)	+0.060 (0.058–0.063)
מרכז פחות רצפה	+0.11 (0.09–0.12)	+0.021 (0.019–0.022)
מרכז פחות שפה	+0.02 (עד –0.00 0.04)	+0.057 (0.054–0.060)
רצפה פחות סביבה	0.00 (עד –0.02 0.03)	0.000 (עד –0.003 0.003)
מרכז פחות סביבה	+0.10 (0.07–0.13)	+0.015 (0.011–0.019)
שפה פחות סביבה	+0.11 (0.09–0.13)	–0.042 (עד –0.044 –0.040)

כל שורה מחסירה טבעת אחת של המכתש מטבעת אחרת, לברזל ולטיטניום, עם רווח 95% שלה בסוגריים. מה שחשוב הוא גודל המספרים: כל הפרש הוא עשירית אחוז משקל או פחות. השורה הירוקה היא המרכזית: הרצפה של המכתש והקרקע שסביבו נושאות אותו ברזל ואותו טיטניום עד הספרה השנייה אחרי הנקודה.

פנים המכתש הוא חומר אחד. מן המרכז אל הקיר ועד השפה הברזל משתנה בכעשירית האחוז, והטיטניום בפחות מזה — הרבה מתחת לפיזור הכיול של המפות עצמן (0.81 wt% TiO₂, 0.43 wt% FeO). פיזור הכיול הוא אי-הוודאות שבה ערך על המפה מייצג את ההרכב האמיתי של פני השטח; הפרש קטן ממנו פי שמונה אינו הבדל בחומר. הרצפה נושאת בדיוק את הברזל והטיטניום של היבשה שסביב המכתש. החומר החוזר שיצר את המכתש התפזר בו באופן אחיד: הוא הניח הרכב אחד מן המרכז ועד השפה, וזהו לקרקע שעליה נחת.

קורא מומחה יטען שהפסגות המרכזיות של מכתשים משמשות כחלונות אל הקרום העמוק, ושמכתש אמור להראות את השכבות שחתך. המדידה עונה על כך למדגם הזה: על פני 7,227 מכתשים, המרכז, שבו עומדת הפסגה, שונה מן הקיר ב-0.08 wt% FeO ומן הסביבה ב-0.10, הרבה בתוך הפיזור של המפות. שום שכבתיות אינה נראית בקנה המידה שהמפות מפרידות.

שני החצאים נושאים אותה כימיה בתוך המכתשים שלהם. לפי המודל, החצי המוביל, 90° מערב, ספג את הנחיתות הקשות ביותר, והחצי המאסף, 90° מזרח, את הרכות ביותר (K.4, §C.5§). המכתשים ב-90° מערב

וב-90° מזרח הותאמו בזוגות אחד לאחד לפי קוטר (בטווח של 5%), ובמבחן שני גם לפי כיסוי ים, לפי המרחק משפת הים (בטווח של 25 ק"מ) ולפי קו הרוחב (בטווח של 10°): 1,235–1,214 זוגות. התאמה אחד לאחד פירושה שכל מכתש של חצי אחד מוצב מול מכתש של החצי השני הדומה לו בכל דבר מלבד קו האורך שלו, כך שכל הבדל שנותר שייך לקו האורך. לכל זוג הושווה ההפרש בין המרכז לסביבה בין שני החצאים:

מרכז פחות סביבה, 90° מזרח פחות 90° מערב (%wt)	FeO	TiO ₂
זוגות לפי קוטר	(עד 0.10 0.16 -) 0.00	(עד 0.020 0.005 -) +0.007
זוגות לפי קוטר, שפת ים וקו רוחב	(עד 0.02 0.22 -) -0.08	(עד 0.003 0.019 -) -0.008

הטבלה נותנת, לכל דרך של התאמה, בכמה מרכז המכתש שונה מסביבתו יותר (או פחות) בחצי המאסף מאשר בחצי המוביל. ערך אפס פירושו ששני החצאים דומים; כל רווח בטבלה מכיל את האפס.

כל רווח כולל את האפס, בכל טבעת של המכתש. נחיתה קשה ב-90° מערב ונחיתה רכה ב-90° מזרח משאירות אותה כימיה בתוך המכתש, משום שהמכתש מלא בחומר החוזר שיצר אותו. עוצמת הנחיתה ניכרת בצורה — הפסגות, השיניים של השפה, החספוס של הרצפה — ולא במה שמונח במכתש. ההסתייגות של מבחן המקור (C.18), שנחיתה קשה עלולה לחשוף את הקרקע שמתחת ונחיתה רכה להשאיר את החומר החוזר למעלה, נענית כך: בשני החצאים המכתש מכיל את החומר החוזר שלו עצמו.

עד כאן: פנים המכתש הוא חומר אחד מן המרכז ועד השפה, זהה לקרקע שעליה נחת, ועוצמת הנחיתה שינתה את צורת המכתש אך לא את מה שבתוכו.

7 STUDY מחקר 7

שלב 1 • הגדרת שאלת המחקר והבעיה

התופעה. מכתש יכול להכיל שני חומרים: הקרקע שאליה חפר והחומר שיצר אותו. **הפער בידע.** האם פנים המכתש שונה מן השפה שלו ומן הקרקע שסביבו, והאם נחיתה קשה ב-90° מערב משאירה בתוך המכתש כימיה שונה מנחיתה רכה ב-90° מזרח — זה לא נמדד על אלפי מכתשים, טבעת אחר טבעת. **שאלת המחקר:** האם הברזל והטיטניום משתנים ממרכז המכתש אל הקיר, השפה, חומר הפליטה והקרקע שסביבו, והאם הם שונים בין שני החצאים במכתשים באותו גודל?

שלב 2 • סקירת ספרות (רקע מדעי)

הפסגות המרכזיות והקירות של מכתשים משמשים כחלונות אל הקרום שמתחת, משום שלפי קריאת ההתנגשות המכה מרימה חומר עמוק אל פני השטח [S29]. ברזל וטיטניום נקראים בכ-240 מ' מן ה-Kaguya Multiband Imager [S10]. לפי קריאה זו פנים המכתש אמור להראות את השכבות שחפר דרכן, ולהיות שונה מפני השטח שסביבו. **מה חדש כאן:** כל מכתש מחולק לשש טבעות הנקראות על אותן מפות, והמכתשים של שני החצאים מותאמים בזוגות אחד לאחד לפי גודל, כיסוי ים, מרחק מים וקו רוחב.

שלב 3 • ניסוח השערת המחקר

המכתש מלא בחומר החוזר שיצר אותו, המפוזר באופן אחיד, ולכן פנים המכתש הוא חומר אחד מן המרכז ועד השפה, זהה לקרקע שעליה נחת; ושני החצאים נושאים אותה כימיה בתוך המכתשים שלהם, משום שעוצמת הנחיתה שינתה את הצורה ולא את החומר.

שלב 4 • מערך המחקר (מתודולוגיה)

סוג המחקר: כמותי, בהשוואה של זוגות. **המדגם:** 7,227 מכתשים של 10–60 ק"מ בתוך 150 ק"מ משפת ים; לחצאים, 1,235–1,214 זוגות של מכתשים ב-90° מערב וב-90° מזרח. **הכלים:** מפות הברזל והטיטניום של

Kaguya ברזולוציה מלאה, מפת הימות של LROC, וקוד שקורא שש טבעות בכל מכתש: המרכז (עד 0.3 מן הרדיוס), הרצפה (0.3–0.7), הקיר הפנימי (0.7–0.95), השפה (0.95–1.1), חומר הפליטה (1.2–2 רדיוסים) והסביבה (3–4 רדיוסים).

שלב 5 · איסוף הנתונים (ביצוע המחקר)

המכתשים והזוגות נבחרו ונשמרו לפני שנקראה כימיה כלשהי. כל זוג הותאם בטווח של 5% בקוטר, ובמבחן השני גם לפי כיסוי ים, לפי המרחק משפת הים בטווח של 25 ק"מ ולפי קו הרוחב בטווח של 10°. הערכים הם הטבלאות שבראש סעיף זה.

שלב 6 · ניתוח הנתונים ועיבודם

בתוך המכתש. כל הפרש בין טבעות ניתן עם רווח 95% שלו. מן המרכז אל הקיר ואל השפה הברזל משתנה ככעשירית האחוז, הטיטניום בפחות מזה; הרצפה פחות הסביבה היא 0.00 לברזל (רווח מ-0.02 עד +0.03) ו-0.000 לטיטניום. ההפרשים האלה הרבה מתחת לפיזור הכיול של המפות עצמן, 0.81 wt% FeO ו-0.43 wt% TiO_2 . בין החצאים. לכל זוג הושווה ההפרש בין המרכז לסביבה בין שני החצאים. כל רווח כולל את האפס, בכל טבעת, בשתי דרכי ההתאמה.

שלב 7 · הסקת מסקנות וכתיבת הדוח

תוצאה. ההשערה נתמכת: פנים המכתש הוא חומר אחד, זהה לקרקע שעליה נחת, ונחיתה קשה ונחיתה רכה משאירות אותה כימיה בתוך המכתש. **מגבלות.** המדגם שוכן ליד הימות, בתוך 150 ק"מ משפה, ואינו מכסה את הרמות הרחוקות; המפות מפרידות כ-240 מ', ולכן שכבות דקות בתוך מכתש אינן מופרדות; והמבחן קורא ברזל וטיטניום, לא תוריום, שהמפה שלו גסה מדי למכתשים בודדים. **כיווני מחקר המשך.** אותן טבעות רחוק מכל ים, ואותו מבחן עם מפת תוריום ברזולוציה גבוהה יותר (L3S).

L.5 המסה הזרה שאינה שם

הסעיפים עד כאן שאלו מאין בא החומר של המכתשים על הירח. סעיף זה שואל את השאלה שמפרידה את המודל מן הספרות בחדות הרבה ביותר: האם משהו בא מבחוץ?

אם המכתשים של הירח נוצרו על ידי גופים פוגעים מבחוץ, הגופים הביאו את המסה שלהם, וחלק ממנה נשאר. הספרות קוראת את החלק הזה ביסודות אוהבי הברזל (סידרופיליים) במידה רבה — אירידיום, אוסמיום, פלטינה, רותניום — שהסיליקט של הירח עצמו כמעט נטול אותם, משום שההתמיינות שלו שלחה אותם אל הליבה, כך שתוספת קטנה בולטת מיד. *סידרופילי* פירושו "אוהב ברזל": כשגוף מותך והמתכת שלו שוקעת ויוצרת ליבה (ההתמיינות שלו), היסודות האלה מתמוססים במתכת ויורדים איתה, ומשאירים את קליפת הסיליקט כמעט בלעדיהם. גוף מבחוץ בעל הרכב כונדריטי — המטאוריטים הסלעיים שמעולם לא הותכו, והמתכת שלהם עדיין מעורבת בהם — נושא אותם ברמה גבוהה הרבה יותר. לכן מעט מגוף כזה, מעורב בקרום, נראה מיד, כפי שכמה טיפות דיו נראות בכוס מים צלולים. אם המכתשים עשויים מחומר ארצי חוזר, כפי שמאמר זה מציע, אין מסה זרה למצוא: החומר החוזר הוא מאותו סוג כמו הקליפה שעליה נחת. השאלה היא אפוא מדידה: כמה מסה זרה תיעוד המכתשים דורש, היכן היא אמורה להימצא, ומה נמצא.

מאחורי הקלעים. המבחן נוסח תחילה כמאזן לירח כולו, ובקנה מידה זה מסה זרה היא חלק קטן ממסת הירח ואומרת מעט. מסה שנחתת נשאת קרוב לפני השטח, ולכן ההשוואה הועברה למקום שבו היא אמורה להימצא, הקרום העליון. ומשום שנכחותם של היסודות אוהבי הברזל לבדה אינה מספרת מאין הם באו — גם המעטפת של כדור הארץ נושאת אותם ביחסים כונדריטיים — נוספו האיזוטופים של היסודות האלה כמדד המכריע.

האיזוטופים הם טביעת האצבע. אטומים של אותו יסוד יכולים להיות שונים במספר הנייטרונים שבגרעין שלהם; הצורות האלה הן האיזוטופים שלו. בכימיה הם מתנהגים באותו אופן, ולכן התכה וערבוב אינם משנים את היחסים ביניהם, אבל היחסים שונים מעט בין הגופים שנוצרו בחלקים שונים של מערכת השמש הצעירה. לכן שתי דגימות יכולות להכיל אותה כמות רותניום ועדיין לספר, לפי האיזוטופים שלו, אם הוא נוצר יחד עם כדור הארץ או עם מטאוריט ממקום אחר, כפי ששני אנשים יכולים לומר אותן מילים במבטאים שונים.

שתי שרשראות של אירועים.

שלב	הספרות: גוף פוגע מבחוץ	LEF: חומר ארצי חוזר
הגוף	אסטרואיד או שביט, בהרכב כונדריטי או מטאוריטי אחר, במהירות 15–20 ק"מ/ש'	חומר שנזרק מפנים כדור הארץ או מן הפתחים של הגוף עצמו, במהירות 2–8 ק"מ/ש'
המכתש	רוב הגוף נמס או מתאדה; חלק ממנו נמלט מן הירח	החומר נוחת על קליפה מאותו סוג ונשאר
מה נשאר	בממוצע כחמישית מן הגוף [S12]	כולו, והוא אינו זר
היכן הוא נמצא	מעורב בקרום העליון, ולפני כ-4.35 מיליארד שנה אבד לליבה יחד עם היסודות אוהבי הברזל שלו [S12]	בשכבות של הקליפה, כקליפה עצמה
החתימה	עודף של יסודות אוהבי ברזל בהרכב איזוטופי מטאוריטי	יסודות אוהבי ברזל בהרכב של כדור הארץ, ביחסים של חומר ארצי בשלב ההתמיינות שלו

הטבלה עוקבת אחר מכתש אחד בשתי הקריאות, שלב אחר שלב. העמודה הימנית היא השרשרת של הספרות; השמאלית — של המודל. השורה האחרונה היא מה שאפשר למדוד היום, ושם שתיהן נפרדות: עודף של יסודות אוהבי ברזל זרים עם טביעת אצבע מטאוריטית, מול יסודות אוהבי ברזל עם טביעת האצבע של כדור הארץ. שלושת המבחנים שלהלן מודדים את הכמות (מבחנים 1 ו-2) ואת טביעת האצבע (מבחן 3).

מבחן 1: המסה הזרה שהמכתשים הנראים דורשים. גודל הגוף שמאחורי כל מכתש בקטלוג חושב לפי חוק קנה המידה של Collins, Melosh ו-[S13] Marcus, בזווית של 45°, לגוף של 2,700 ק"ג/מ"ק על מטרה של 2,800 ק"ג/מ"ק, עם מעבר למכתשים מורכבים ב-15–20 ק"מ, על כל המכתשים של 1 ק"מ ומעלה ([S16] Wang & Wu ל-1–20 ק"מ, [S6] Robbins ל-20 ק"מ ומעלה). חוק קנה מידה מסוג זה הוא הכלל של הספרות עצמה לחישוב לאחר, מרוחב המכתש לגודל הגוף שחפר אותו, בהינתן מהירותו, זווית הפגיעה והצפיפויות של הגוף והמטרה; מכתשים מורכבים, מעל 15–20 ק"מ, הם אלה שיש להם פסגות מרכזיות וקירות מדורגים, שצורתם משנה את הכלל. השימוש בכלל של הספרות פירושו שהמסה שנמצאת היא המסה שהקריאה של הספרות עצמה דורשת:

מכתשים	מספר	מסה זרה ב-18 ק"מ/ש' (ק"ג)	חלק
South Pole–Aitken	1	3.3×10^{19}	68%
אגנים אחרים, 300 ק"מ ומעלה	32	1.4×10^{19}	30%
מכתשים של 20–300 ק"מ	6,940	1.0×10^{18}	2%
מכתשים של 1–20 ק"מ	1,311,414	1.2×10^{16}	0.03%
הכול		$4.4\text{--}5.0 \times 10^{19}$	

הטבלה מסכמת את הגופים לפי גודל המכתש, ב-18 ק"מ/ש', קרוב לאמצע הטווח של 15–20 ק"מ/ש' בספרות. השורות האדומות נושאות כמעט את כל המסה: מכתש אחד, South Pole–Aitken, דורש שני שלישים ממנה, ו-32 האגנים הגדולים האחרים — כמעט שליש (גרסה קודמת נתנה 1.1×10^{19} ק"ג ורבע). 1.3 מיליון המכתשים הקטנים יחד דורשים פחות מאלפית. הסיבה היא שמסת הגוף גדלה עם החזקה השלישית של גודלו: גוף אחד ברוחב מאות קילומטרים שוקל יותר ממיליון גופים של כמה מאות מטרים.

ב-12–25 ק"מ/ש' הסכום הכולל נע בין $10^{19} \times 2.5$ – 10 ק"ג. אלה הם רק המכתשים הנראים היום; המודל של הספרות עצמה להפצצה, שכולל את המכתשים שנמחקו מאז, דורש 3.7×10^{20} ק"ג מאז 4.5 מיליארד שנה [S12].

מבחן 2: היכן היא אמורה להימצא, ומה יש שם. גוף שנוחת נשאר קרוב לפני השטח, ולכן שרידיו צריכים להימצא בקרום העליון; השכבה שבה משתמשים כאן היא 5 הק"מ העליונים. עם שיעור השימור של הספרות עצמה — חמישית מן הגוף בממוצע, עד שלוש חמישיות בהערכות מוקדמות יותר [S12] — המכתשים הנראים לבדם משאירים $10^{19} \times 0.9$ – 3.0 ק"ג של חומר זר. מפוזר על פני 5 הק"מ העליונים של הקרום, זה 2%–6% ממנו (גרסה קודמת נתנה 2%–5%); ההפצצה כולה של הספרות, בשימור של חמישית, היא 15%. מה שהקרום מכיל מוערך מן היסודות אוהבי הברזל שלו ב- $10^{19} \times 0.45$ – 1.0 ק"ג [S12] — 2%–0.9 מ-5 הק"מ העליונים, גם אם כולו היה מונח שם:

חומר זר ב-5 הק"מ העליונים של הקרום	מסה (ק"ג)	חלק מן השכבה
נדרש: ההפצצה כולה של הספרות, חמישית נשמרת	7.4×10^{19}	15%
נדרש: המכתשים הנראים בלבד, חמישית עד שלוש חמישיות נשמרות	$10^{19} \times 0.9$ – 3.0	2%–6%
נמצא: כל היסודות אוהבי הברזל של הקרום, כאילו כולם בשכבה הזו	$10^{19} \times 0.45$ – 1.0	2%–0.9%

השורות האדומות הן מה שהקריאה של הספרות דורשת שהשכבה תכיל; השורה הירוקה היא מה שנמצא. הצבע דוהה מן הדרישה הגדולה ביותר אל המדידה. שורת הנמצא נדיבה כלפי הספרות: היא מציבה את כל היסודות אוהבי הברזל של הקרום בשכבה האחת הזו, ועדיין אינה מגיעה לדרישה.

הקרום מכיל פחות ממה שהמכתשים הנראים לבדם דורשים, עד פי 6.7 (גרסה קודמת אמרה "עד פי שישה"), ובין שביעית לחלק השישה-עשר ממה שההפצצה של הספרות דורשת (גרסה קודמת נתנה חלק שבעה-עשר). הספרות סוגרת את הפער בשני צעדים: שיעור שימור נמוך, שהורד מכשלוש חמישיות לחמישית, ואובדן לליבה של כל מה שהגיע לפני כ-4.35 מיליארד שנה [S12]. יחד הם גורמים לכ-93% מן המסה שהגיעה להיעלם. גוף שיצר מכתש אינו יכול להיקבר כולו: אם נחת על הקרקע, שרידיו צריכים להישאר ברמה שאפשר למדוד, והמכתשים הנראים היום נוצרו על קרום שכבר היה מוצק, שהיסודות אוהבי הברזל שלו כבר לא יכלו לשקוע אל הליבה. האובדן לליבה יכול לחול רק על ירח שעדיין היה מותך; הוא אינו יכול להסיר את השרידים של המכתשים שעדיין נראים על פניו המוצקים.

מבחן 3: של מי היסודות אוהבי הברזל. האיזוטופים של רותניום מפרידים בין המאגרים של מערכת השמש — האזורים של מערכת השמש הצעירה שהגופים שלהם נושאים טביעות אצבע נבדלות — והם נמדדו כעת בתוצרי מכתשים ירחיים: בדגימה של Apollo 16 ובמטאוריט ירחי, הרתניום שקריאת ההתנגשות מייחסת לרכיב זר (של הגוף הפוגע) אינו ניתן להבחנה מזה של הסיליקט של כדור הארץ [S14]. המחברים קוראים זאת כגופים מן האזור שסיפק את ה"ציפוי המאוחר" של כדור הארץ — המסה הקטנה שכדור הארץ אמור היה לקבל אחרי

שהליבה שלו נוצרה, ושנתנה למעטפת שלו את היסודות אוהבי הברזל שלה — ומבקשים דגימות נוספות. במודל זה נקרא ישירות: היסודות אוהבי הברזל במכתשי הירח הם של כדור הארץ, משום שהחומר שיצר את המכתשים היה של כדור הארץ. ההתכות שמיוחסות לגוף שיצר את אגן Imbrium נושאות יחסים של אוסמיום, רותניום, פלטינה ופלדיום שאינם תואמים שום קבוצה ידועה של כונדריטים [S15]; הן נדונות יחד עם האגנים של הימות במאמר 5. במודל אין הן זקוקות לגוף לא ידוע: הן חומר ארצי בשלב ההתמיינות שלו.

הספרות והמודל, מבחן אחר מבחן.

מבחן	תוצאה	הספרות קוראת	המודל קורא	מסקנה
מסה זרה למכתשים הנראים	$4.4-5.0 \times 10^{19}$ ק"ג ב-18 ק"מ/ש'; South Pole-Aitken 68%	המסה שהגופים הביאו	אין מסה זרה: החומר ארצי	השאלה היא היכן היא
חומר זר ב-5 הק"מ העליונים	נדרש 2%-6%; נמצא 0.9%-2% לכל היותר	רוב הגוף התאדה; חמישית נשמרה	אין מה לשמור	פחות מן הנדרש, עד פי 6.7
ההפצצה כולה	נדרש 3.7×10^{20} ק"ג; הקרום והמעטפת מכילים $2.1-2.7 \times 10^{19}$	שימור נמוך, ואובדן לליבה לפני 4.35 מיליארד שנה: כ-93% נעלמו	אין מסה חסרה להסביר	הספרות צריכה שהמסה תיעלם; המודל לא
איזוטופי רותניום של התכות מכתשים	כמו הסיליקט של כדור הארץ [S14]	גופים מן האזור של הציפוי המאוחר של כדור הארץ	החומר של כדור הארץ עצמו	כפי שהמודל חוזה; שתי דגימות
יחסי היסודות אוהבי הברזל בהתכות Imbrium	אינם תואמים שום קבוצת כונדריטים [S15]	גוף לא ידוע, או מתכת של ליבת פלנטזימל	חומר ארצי ידוע, בשלב ההתמיינות שלו	מוסבר בלי סוג חדש של גוף
שברים של גופים זרים	גרגרים בודדים: כונדרולה ב-Chang'e-5, שרידים [S17] דמויי CI ב-Chang'e-6 [S18]	שרידים של הגופים הפוגעים	אבק חלל, בכמויות הקטנות שהמודל מתיר	כמויות שהמודל מתיר

הטבלה מציבה את הקריאה של הספרות ואת זו של המודל זו לצד זו לכל מבחן. העמודה האחרונה מוצללת לפי עוצמת התמיכה של התוצאה במודל: ניטרלית בשורה הראשונה, שרק קובעת את המסה שיש לחפש, וירוקה עמוקה יותר במקום שבו הספרות צריכה הנחה נוספת והמודל לא. השורה האחרונה היא ההתנגדות ההוגנת: נמצאו גרגרים זרים. הם גרגרים בודדים — כונדרולה, חרוז קטן ועגול האופייני לכונדריטים, בקרקע של Chang'e-5, ושרידים הדומים לכונדריטים מסוג CI בקרקע של Chang'e-6 — הכמויות הקטנות של אבק חלל שנופלות על כל משטח, ולא המסה שהמכתשים היו דורשים.

מה נובע מכך. תיעוד המכתשים, כשהוא נקרא כגופים פוגעים מבחוץ, דורש מסה זרה שהירח אינו מכיל, ודרך המוצא של הספרות היא להניח שרובה נעלם. היסודות אוהבי הברזל שנמצאים נושאים, במקום שבו נמדדו, את ההרכב האיזוטופי של כדור הארץ. שני הדברים הם מה שהמודל חוזה: המכתשים עשויים מחומר ארצי חוזר, ואין מסה חסרה להסביר. המבחן מנוסח ב-O.18: היסודות אוהבי הברזל של התכות המכתשים הירחיות נושאים, לפי האיזוטופים שלהם, את ההרכב של כדור הארץ, וכל חלק מטאוריטי נשאר בתוך מה שאבק חלל מספק.

התופעה. הספרות גורסת שהמכתשים של הירח נחפרו על ידי גופים מבחוץ. **הפער בידע.** גוף שנוחת משאיר אחריו חלק מן המסה שלו, וגופים מבחוץ עשירים ביסודות שהקרום של הירח חסר אותם: היסודות אוהבי הברזל, כמו אירידיום, אוסמיום ורותניום. הספרות מסבירה את הכמות הקטנה שנמצאת בכך שרובה התאדה או נקבר. כמה מסה זרה המכתשים הנראים דורשים, וכמה הקרום מכיל בפועל — זה לא הוצב זה לצד זה. **שאלת המחקר:** כמה חומר זר אמור הקרום העליון להכיל אילו המכתשים הנראים נוצרו על ידי גופים מבחוץ, כמה הוא מכיל, ומה אומרים האיזוטופים של התכות המכתשים על מקורם של היסודות אוהבי הברזל שלהן?

שלב 2 · סקירת ספרות (רקע מדעי)

היסודות אוהבי הברזל של הקרום והמעטפת נותנים את המסה שהירח קיבל אחרי שנוצר, וההפצצה כולה של הספרות דורשת כ- 3.7×10^{20} ק"ג [S12]. מסת הגוף נמצאת מגודל המכתש שלו לפי חוקי קנה מידה [S13]. איזוטופי הרותניום של התכות מכתשים ירחיות דומים לאלה של הסיליקט של כדור הארץ [S14]; יחסי היסודות אוהבי הברזל של התכות Imbrium אינם תואמים שום קבוצה של כונדריטים [S15]; גרגרים בודדים של גופים זרים נמצאו בקרקעות של Chang'e-5 ו-Chang'e-6 [S17, S18]. **מה חדש כאן:** המסה שהמכתשים הנראים דורשים מחושבת מכתש אחר מכתש ומושוית עם מה שהקרום העליון מכיל, שכבה אחר שכבה.

שלב 3 · ניסוח השערת המחקר

המכתשים עשויים מחומר ארצי חוזר, ולכן הקרום העליון מכיל הרבה פחות מסה זרה ממה שגופים מבחוץ היו משאירים, והיסודות אוהבי הברזל שנמצאים בו נושאים את האיזוטופים של כדור הארץ.

שלב 4 · מערך המחקר (מתודולוגיה)

סוג המחקר: כמותי, בחישוב מול כמויות שנמדדו, עם סקירה של ספרות האיזוטופים. **המדגם:** כל מכתש של 1 ק"מ ומעלה, כ-1.32 מיליון [Wang & Wu [S16] ל-20–1 ק"מ), כש-South Pole–Aitken והאגנים הגדולים בנפרד; הנתונים שפורסמו על יסודות אוהבי ברזל ואיזוטופים בהתכות ובקרקעות ירחיות. **הכלים:** חוק קנה המידה של Collins, Melosh ו-Marcus [S13], שהופך את גודל המכתש למסת הגוף שחפר אותו, לגוף של 2,700 ק"ג/מ"ק על מטרה של 2,800 ק"ג/מ"ק בזווית של 45° וב-18 ק"מ/ש; חלק נשמר של חמישית [S12]; ומאזני היסודות אוהבי הברזל שפורסמו [S12].

שלב 5 · איסוף הנתונים (ביצוע המחקר)

מסת הגוף חושבה לכל מכתש, וסוכמה לפי גודל, כש-South Pole–Aitken והאגנים הגדולים בנפרד. מאזן היסודות אוהבי הברזל של הקרום והמעטפת, ונתוני האיזוטופים, נלקחו מן הספרות כפי שפורסמו. הערכים הם הטבלאות של סעיף זה.

שלב 6 · ניתוח הנתונים ועיבודם

מבחן 1, המכתשים הנראים. הם דורשים $4.4-5.0 \times 10^{19}$ ק"ג של מסה זרה, ש-South Pole–Aitken לבדו הוא 68% ממנה. **מבחן 2, הק"מ העליונים.** מפוזרת על פני הקרום העליון, החמישית הנשמרת הייתה 2–6% ממנו; מה שנמצא, לכל היותר, הוא 0.9–2%. **ההפצצה כולה.** היא דורשת 3.7×10^{20} ק"ג; הקרום והמעטפת יחד מכילים $2.1-2.7 \times 10^{19}$, כחלק החמישה-עשר ממנה. **מבחן 3, האיזוטופים.** הרותניום של התכות המכתשים הוא של כדור הארץ; התכות Imbrium אינן תואמות שום כונדריט.

שלב 7 · הסקת מסקנות וכתובת הדוח

תוצאה. ההשערה נתמכת: הקרום מכיל חלק קטן מן המסה הזרה שהמכתשים הנראים דורשים, והרותניום של התכות המכתשים ארצי; התשובה של הספרות, שהמסה התאדתה או נקברה, חייבת להיות מונחת לכל מכתש, ואילו המודל אינו צריך שום הנחה. **מגבלות.** המסה המחושבת נשענת על מהירות, צפיפות וחלק נשמר שהונחו, וכל אחד מהם אינו ודאי בגורם של כשניים; הקרום העליון נדגם במקומות מעטים; וגרגרים זרים בודדים נמצאים,

בכמויות הקטנות שהמודל מתיר כאבק חלל. **כיווני מחקר המשך.** היסודות אוהבי הברזל ואיזוטופי הרתוניום של ההתכות של מכתשים בודדים בגודל ידוע, כך שאפשר יהיה לשקול את המסה הנשמרת של מכתש אחד מול מה שגודלו דורש.

L.6 החומר הארצי אחרי השחרור

המכתשים שנקראו עד כאן נוצרו כשהירח עדיין היה מחובר לכדור הארץ, או על ידי הפתחים שלו עצמו. סעיף זה פונה אל המכתשים שנוצרו אחרי השחרור, ושואל מה היה החומר שיצר אותם.

בשעת השחרור הירח היה עגול, עם קליפה חיצונית קשיחה; הוא עבר פחיסות והתעגל שוב כשעדיין היה מחובר (מאמר 7). האגס — הבליטה של כדור הארץ שהירח היה קצה שלה — נאסף בחזרה אל כדור הארץ במיון, לאט, במשך עשרות עד מאות מיליוני שנים אחרי השחרור, והשאיר קמטים על פני השטח שלו (מאמר 9). כדור הארץ לא שקט: הפתחים שלו המשיכו לזרוק חומר, שרובו נפל בחזרה אליו, וחלקו הגיע אל הירח ונחת עליו (E.4§).

החיזוי. ים הוא חתך דרך השכבות של קצה האגס. אמצע החתך מכיל את הברזל, ויחד איתו את התוריום שעלה ממעמקי כדור הארץ; הדוקרן שחדר אל הגוף עשוי להכיל יותר מן החומר הקל. החומר שכדור הארץ המשיך לזרוק אחרי השחרור היה דבר אחר: החלק של הזרימה היוצאת מכדור הארץ שיכול היה להימלט ממנו. החומר הכבד שקע בחזרה במורד האגס לעבר כדור הארץ, והקל עלה (מאמר 3, C.10§); מה שעזב את כדור הארץ והגיע אל הירח היה החלק הקל יותר. ההימלטות מכדור הארץ לא הייתה קלה: כדי להגיע אל הירח החומר היה צריך לעזוב את פני כדור הארץ במהירות של 8.8 ק"מ/ש' או יותר, שעלתה לעבר מהירות המילוט של כדור הארץ ככל שהירח התרחק (E.4§). המכתשים שנוצרו על הימות אחרי השחרור (חלק E) נבנו ממנו. לכן המודל חוזה שהחומר של המכתשים האלה — חומר הפליטה, הנקרא בנפרד מרצפת הים שעליה נחת — דל יותר בברזל מן הים, העשיר ביותר בברזל על פני הירח כולו.

מה זה מראה. חומר מכדור הארץ שנחת על הירח אחרי השחרור מראה שכדור הארץ נשאר פעיל אחרי שהירח עזב אותו; הפעילות דעכה עם הזמן — החלקים שהגיעו אל הירח נעשו קטנים יותר, עדיין חמים (E.4§) — אבל היא נמשכה.

STUDY 12 מחקר 12

שלב 1 • הגדרת שאלת המחקר והבעיה

התופעה. המכתשים על הבזלת של הצד הקרוב נוצרו אחרי השחרור מחומר מכדור הארץ — חלקם כשהרצפה עוד הייתה חמה (מומסים ומורמים), והחדים אחרי שקפאה (מחקרים 5 ו-9). **הפער בידע.** ממה עשוי החומר הזה, לעומת הים שעליו נחת, לא נמדד מכתש אחר מכתש. **שאלת המחקר:** האם החומר שנוזק מן המכתשים שעל הבזלת דל או עשיר יותר בברזל ובתוריום מן הבזלת שסביבם, על רצפות הימות ועל המישורים?

שלב 2 • סקירת ספרות (רקע מדעי)

ברזל וטיטניום נקראים מן ה-[S10] Kaguya Multiband Imager, ותוריום מן-[S11] Lunar Prospector. בספרות חומר הפליטה של מכתש על ים הוא המטרה שהוא חפר: הבזלת, וחומר הרמות שמתחתיה במקום שבו המכתש הגיע דרך הבזלת [S26]. קרקעות באתר Apollo 12 שקשורות לקרניים של Copernicus עשירות בתוריום ודלות יותר בברזל מן הבזלת המקומית [S30]. הספרות קוראת את הקרניים של מכתש כפסים בהירים של חומר הפליטה שלו שיוצאים ממנו כלפי חוץ, לפעמים לאורך מאות קילומטרים; במודל קרן היא רישום בתוך הקרקע שמתחת לפני השטח, שנוצר רק במקום שבו חומר נחת על קרקעית שכבר התקררה (עבודה נוספת, סעיף 7). **מה חדש כאן:** כל מכתש על הבזלת של הצד הקרוב נקרא מול הבזלת שסביבו מיד, רצפות הימות והמישורים בנפרד, לפי סוג וגודל, עם ביקורת לעומק שאליו חפר המכתש.

שלב 3 • ניסוח השערת המחקר

החומר מכדור הארץ היה החלק הקל יותר שלו; לכן חומר הפליטה של המכתשים שעל הבזלת דל יותר בברזל מן הבזלת שסביבם, על רצפות הימות ועל המישורים כאחד.

שלב 4 • מערך המחקר (מתודולוגיה)

סוג המחקר: כמותי, מכתש אחר מכתש, עם ביקורת של עומק החפירה. **המדגם:** 3,478 המכתשים של 3 ק"מ ומעלה על הבזלת של הצד הקרוב (מחקר 5), 324 על רצפות הימות ו-3,154 על המישורים; תוריום ל-62 המכתשים של 60 ק"מ ומעלה. **הכלים:** מפות הברזל והטיטניום של Kaguya ב-128 פיקסלים למעלה, מפת התוריום של Lunar Prospector, מפת הימות של LROC; חומר הפליטה נקרא ב-1.2–2 רדיוסים, הים שמסביב ב-3–4 רדיוסים, פיקסלי ים בלבד; ומפה שפורסמה של עובי הבזלת כדי לסמן את המכתשים שחפרו דרכה. הביקורת לעומק חשובה בגלל הקריאה של הספרות: מכתש שחתך דרך הבזלת מעלה את חומר הרמות הדל שמתחתיה, וחומר הפליטה שלו יהיה דל בברזל מסיבה זו בלבד. המכתשים שנשארו בתוך הבזלת הם המבחן הנקי.

שלב 5 • איסוף הנתונים (ביצוע המחקר)

המכתשים והסוגים שלהם נקבעו לפני שנקראה הכימיה. כל מכתש נשמר; מכתשים שבסביבתם יש מעט מדי ים ממופה הופרדו ודווחו.

שלב 6 • ניתוח הנתונים ועיבודם

כל המכתשים. חומר הפליטה דל יותר בברזל מן הים שסביבו בכל סוג ובכל גודל: ב-0.3–0.9 wt% FeO למכתשים של 5–10 ק"מ, וב-1–6 wt% לגדולים יותר. **ימות ומישורים.** על רצפות הימות חומר הפליטה דל מן הבזלת שסביבו בחציון של 0.20 wt% (שניים מכל שלושה מכתשים דלים יותר), מ-0.11– ב-3–5 ק"מ ועד 3.8– ב-20 ק"מ ומעלה; על המישורים ב-0.36 (71% דלים יותר), מ-0.13– עד 2.9–. **מכתשים בתוך הבזלת.** בין המכתשים שחומר הפליטה שלהם מונח כולו על ים ממופה ושלא חפרו דרך הבזלת, ההפרש קטן: 0.11– wt% למכתשים החדים (97), +0.02 למרוחים (6), 0.03– למותכים (36), בתוך פיזור הכיול של המפות (0.81 wt%). הסוגים החד, המרוח והמומס הם אלה של D.28, שנקבעו לפי העומק מול מכתשי רמות באותו גודל: מכתש מומס, רדוד יותר מ-95% מהם, נחת על הקרקע הפעילה והותך לתוכה; מכתש מרוח רדוד יותר מ-75% מהם; מכתש חד נוצר אחרי שהקרקע קפאה. **תוריום.** למכתשים של 60 ק"מ ומעלה חומר הפליטה נושא את התוריום של הים שסביבו, בטווח של כ-0.1 ppm. **דגימות.** הקרקעות של Apollo 12 שקשורות ל-Copernicus נושאות 7.6–9.4 ppm תוריום לעומת 0.83 בבזלת המקומית, ו-14.0–15.7 wt% FeO לעומת 20.5.

שלב 7 • הסקת מסקנות וכתובת הדוח

תוצאה. ההשערה נתמכת במדגם המלא: החומר של המכתשים שעל הבזלת דל יותר בברזל מן הבזלת, על רצפות הימות ועל המישורים כאחד, והדגימה הקשורה למכתש שנוצר על הים אחרי שקפא דלה יותר בברזל ועשירה יותר בתוריום מן הבזלת המקומית. **מגבלות.** הספרות קוראת את חומר הפליטה הדל כחומר רמות שנחפר מתחת לבזלת; בין המכתשים שנשארו בתוך הבזלת ההפרש נופל בתוך הפיזור של המפות, ולכן המפות האלה אינן מפרידות בין שתי הקריאות; מפת התוריום גסה מדי למכתשים הקטנים. **כיווני מחקר המשך.** הדגימות המוחזרות של חומר הפליטה של מכתשים בודדים שנוצרו על הימות, הנקראות לברזל, לתוריום ולאיזוטופי הרתניום יחד.

L.7 הצד הקרוב שומר יותר מן המכתשים הקטנים האחרונים

L.68 קרא ממה היה עשוי החומר מכדור הארץ. סעיף זה קורא היכן הוא נפל. כדור הארץ עומד תמיד בשמי הצד הקרוב, ולכן חומר שנזרק ממנו מגיע לצד הזה ביתר קלות; אם כדור הארץ המשיך לזרוק אחרי השחרור,

המכתשים האחרונים צריכים לנטות אל הצד הקרוב. המודל קורא לכדור הארץ המפזר האחרון: המקור האחרון שזרק חומר על הירח.

אם כדור הארץ המשיך לזרוק חומר אחרי השחרור, וחלקו הגיע אל הירח, המכתשים האחרונים שיצר צריכים להימצא על היבשה של הירח כולו — ומעט יותר בצד שפונה אליו. כשסופרים על היבשה בלבד, כשכל ים מוסר, המכתשים הקטנים והטריים רבים יותר בצד הקרוב; המכתשים הגדולים והישנים יותר מעטים שם, משום שהצד הקרוב נמחק על ידי החום של המגע ועל ידי הימות שלו עצמו:

מכתשים על היבשה (למיליון קמ"ר)	הצד הקרוב	הצד הרחוק	קרוב מול רחוק
2–1 ק"מ, טריים	14,103	11,814	1.19 (1.12–1.27) ×
2–1 ק"מ, כולם	27,708	24,577	1.13 ×
5–2 ק"מ	9,413	10,997	0.86 ×
10–5 ק"מ	1,299	2,070	0.63 ×
20–10 ק"מ	364	687	0.53 ×

הטבלה נקראת מלמעלה למטה, מן המכתשים הקטנים והצעירים ביותר אל הגדולים והישנים יותר. העמודה האחרונה היא היחס בין הקרוב לרחוק; ירוק מסמן עודף בצד הקרוב, אדום — חוסר. הצבע עובר מירוק לאדום ככל שהמכתשים גדלים: הצד הקרוב מכיל 19% יותר מן המכתשים הקטנים והטריים ורק כמחצית מן המכתשים של 20–10 ק"מ. שתי היסטוריות כתובות בעמודה אחת: המכתשים הקטנים מתעדים את ההגעות האחרונות, שהעדיפו את הצד הקרוב; הגדולים מתעדים את מה שהצד הקרוב איבד קודם לכן.

הצד הקרוב איבד את המכתשים הישנים שלו מוקדם וצבר יותר מן האחרונים. המפזר האחרון של המכתשים על הירח היה כדור הארץ (מאמר 5, מחקרים 7 ו-12; מאמר 3, C.11§).

STUDY 9 מחקר 9

שלב 1 · הגדרת שאלת המחקר והבעיה

התופעה. המכתשים הקטנים והטריים ביותר הם האחרונים שנוצרו על הירח. **הפער בידע.** אם כדור הארץ המשיך לזרוק חומר אחרי השחרור, חלקו הגיע אל הירח ויצר את המכתשים האלה; מקור שפונה אל הצד הקרוב אמור להשאיר שם יותר מהם. רצפות הימות אינן יכולות לבחון זאת, משום שהימות של הצד הקרוב שוכנים ליד המגע וקפאו מאוחר (מאמר 5, מחקר 12); היבשה יכולה. **שאלת המחקר:** על היבשה, כשכל ים מוסר, האם יש יותר מכתשים קטנים וטריים למיליון קמ"ר בצד הקרוב מאשר בצד הרחוק?

שלב 2 · סקירת ספרות (רקע מדעי)

בספרות המכתשים הקטנים באים מגופים מבחוץ, בשטף כמעט אחיד על פני הירח, עם עודף קטן בצד המוביל [S22, S23]; הרמות הישנות רוויות במכתשים קטנים, כך שמכתש חדש מוחק מכתש ישן; והמכתשים הצעירים בעלי הקרניים מפזרים סביבם שדות של מכתשים משניים. מכתשים משניים נוצרים על ידי הגושים שמכתש גדול זורק החוצה, שנפלים בחזרה בקרבתו; הם אינם הגעות חדשות ממקום אחר, ושדה שלהם יכול לחקות עודף. **מה חדש כאן:** היבשה של שני הצדדים מושווית באותם קווי רוחב, כשהימות ו-SPA מוסרים, השדות של המכתשים הצעירים בעלי הקרניים מוסרים בשני הצדדים, והמכתשים הטריים נספרים בנפרד מן הישנים.

שלב 3 · ניסוח השערת המחקר

המכתשים הקטנים האחרונים באו מכדור הארץ אחרי השחרור; הם נפלו על הירח כולו, ומעט יותר בצד שפונה אל כדור הארץ. לכן המכתשים הקטנים והטריים רבים יותר על היבשה של הצד הקרוב מאשר על היבשה של

הצד הרחוק, ואילו המכתשים הגדולים והישנים יותר, שנמחקו בצד הקרוב על ידי המגע והימות שלו, מעטים שם.

שלב 4 · מערך המחקר (מתודולוגיה)

סוג המחקר: כמותי; צפיפויות מושוות בין שני הצדדים. **המדגם:** כל מכתש של 1–20 ק"מ בקטלוג של Wang & Wu [S16] על היבשה, בקו רוחב של עד 60°, מחוץ לכל ים ממופה ומחוץ ל-SPA. **הכלים:** הקטלוג עם העומקים שלו, מפת הימות של LROC, וקוד שמודד את שטח היבשה בכל צד וסופר את המכתשים שעליה.

בחירה	למה, במילים פשוטות
כל ים מוסר, בצד הקרוב וברחוק	הימות כיסו מכתשים; רק היבשה מושווית
קו רוחב עד 60°, SPA מוסר	הקטבים צפופים במכתשים (מאמר 7), ו-SPA מחק את מה שהיה בתוכו
מכתשים טריים נספרים בנפרד	על היבשה הישנה המכתשים הקטנים רוויים: מכתש חדש מוחק מכתש ישן, ולכן רק הטריים שומרים את ההגעות האחרונות
שדות של 16 מכתשים צעירים בעלי קרניים מוסרים, 10 רדיוסי מכתש, בשני הצדדים	Copernicus, Tycho, Jackson, King ואחרים פיזרו מכתשים משניים סביבם

מכתש נספר כטרי כשהוא עמוק יותר ממכתש היבשה החציוני בגודלו. מכתש נעשה רדוד יותר עם הזמן, ככל שקירותיו מתמוטטים ורצפתו מתמלאת, ולכן החצי העמוק יותר בכל גודל מכיל את המכתשים הצעירים יותר. רוויה, בטבלה שלמעלה, היא מצב של משטח צפוף כל כך שכמו דף מלא בחותמות, כל חותמת חדשה מכסה ישנה והספירה כבר אינה גדלה.

שלב 5 · איסוף הנתונים (ביצוע המחקר)

היבשה של כל צד נמדדה בדגימה של ארבעה מיליון נקודות; המכתשים שעליה נספרו לפי גודל, כולם והטריים בנפרד, תחילה עם כל מכתש ואחר כך כשהשדות המשניים מוסרים. הערכים הם הטבלה שלמעלה (השדות המשניים מוסרים).

שלב 6 · ניתוח הנתונים ועיבודם

העודף. הצד הקרוב נושא פי 1.19 מן המכתשים הטריים של 1–2 ק"מ שבצד הרחוק. האם זה מקרה? מכתשים מתקבצים, ולכן הרווח נמצא בדגימה חוזרת של תאים שלמים של 10° על 10° ולא של מכתשים בודדים: 1.12–1.27; הוא אינו כולל את האחד. דגימה חוזרת מגרילה את התאים שוב ושוב באקראי, עם חזרות, ומחשבת את היחס מחדש בכל פעם; הפיזור של התוצאות נותן את הרווח. הגרלה של תאים שלמים שומרת כל צביר יחד, כך שקבוצה צפופה אחת אינה יכולה להיחשב כמכתשים בלתי תלויים רבים. לפי קו רוחב. לפני שהוסרו השדות המשניים, המכתשים הטריים של 1–2 ק"מ היו רבים פי 1.12 בצד הקרוב בתוך 30° מקו המשווה, ופי 1.39 ב-30°–60°; הסרת השדות השאירה את העודף הכולל ללא שינוי (1.20 לפני, 1.19 אחרי). באותו מרחק מים. מכתשים קטנים ליד ים יכולים לבוא מן ההתזה שלו בזמן שהיה פעיל, ורוב היבשה של הצד הקרוב שוכנת ליד ים. לכן היבשה של שני הצדדים הושוותה רצועה אחר רצועה של מרחק משפת הים הקרובה: הצד הקרוב נושא יותר מכתשים טריים של 1–2 ק"מ בכל רצועה — 1.26 (1.41–1.13) בתוך 50 ק"מ, 1.25 (1.41–1.13) ב-50–150 ק"מ, 1.19 (1.31–1.08) ב-150–300 ק"מ, 1.14 (1.29–1.02) ב-300–600 ק"מ, ו-1.51 (1.78–1.21) מעבר ל-600 ק"מ. העודף אינו ההתזה של הימות. הוא הגדול ביותר ברצועה הרחוקה ביותר מכל ים, שם שום ים לא יכול היה לספק אותו. המכתשים הגדולים יותר. מ-2 ק"מ ומעלה הצד הקרוב נושא פחות: 0.86 ב-2–5 ק"מ, 0.63 ב-5–10 ק"מ ו-0.53 ב-10–20 ק"מ.

שלב 7 · הסקת מסקנות וכתובת הדוח

תוצאה. ההשערה נתמכת: המכתשים האחרונים, הקטנים והטריים, רבים יותר בצד הקרוב, מעבר למקרה ואחרי הסרת השדות המשניים, ואילו המכתשים הישנים והגדולים יותר מעטים שם. כדור הארץ היה פעיל אחרי השחרור, והוא היה המפזר האחרון של מכתשים על הירח. **מגבלות.** המכתשים הטריים מוגדרים לפי כלל אחד; רשימת המכתשים הצעירים בעלי הקרניים שהוסרו אינה שלמה. **כיווני מחקר המשך.** הכימיה של המכתשים הטריים (L.6§), וגודל העודף בצד הקרוב שנחזה מלכידה של חומר איטי על ידי הירח.

עד כאן, הכימיה של המכתשים: החומר שסביב כל ים בא מאותו ים; פנים המכתש הוא החומר החוזר שיצר אותו; לא נמצאת מסה זרה, והיסודות אוהבי הברזל שישנם נושאים את טביעת האצבע של כדור הארץ; ואחרי השחרור כדור הארץ המשיך לזרוק את החומר הקל יותר שלו אל הירח, יותר אל הצד שפונה אליו, כמפזר האחרון של המכתשים.

L.8 תיעוד שנשמר שלם: הירח מעולם לא עבר דרך טבעת

תיעוד המכתשים של המאמר הזה קיים משום ששום דבר לא שחק אותו. גוף שעובר דרך טבעת של קרח ואבק נשחק בה: השקעים שלו נשחקים ונעשים רדודים, השפות שלו מתעגלות, המכתשים הקטנים ביותר שלו נמחקים, והגוף עצמו קטן. משך הזמן שגוף שווה בטבעת קובע כמה מפניו הראשונים הוא מאבד. ההשוואה שלהלן מעמידה את הירח לצד שני הירחים של מאדים.

גוף	זמן בטבעת	מה נראה היום
Deimos	ממושך, בטבעת הצפופה	חלק; השקעים נשחקו ונעשו רדודים (עומק חציוני של 1.9% מהרוחב, לעומת 5.5% על Phobos); אין חריצים; קטן ממה שהיה כשיצא
Phobos	קצר, בשולי הטבעת הדקים והגזיזים	חרוט אך לא מוחלק; החריצים והקמטים נשמרו
הירח	אין	תיעוד רווי על הרמות; האגנים הגדולים והשפות שלהם נשמרו; הגוף שלם

טבלה L.8. הזמן בטבעת והפנים שנותרו. הצבע מראה כמה מן הפנים הראשונים נשחק.

סביב כדור הארץ הצעיר טבעת לא יכלה להיווצר: האגס, שהסתובב עם כדור הארץ עד קו הקורוטציה, טאטא את הרצועה שבה הייתה עומדת טבעת ואסף את החומר שלה; החומרים הנדיפים עלו דרך החיבור אל תוך הגוף במקום לברוח; וכדור הארץ החם, העטוף באטמוספירת אדים, לא הניח למים להתעבות לקרח בגבהים האלה (מאמר 3, C.9a§). הרמות הרוויות של הירח הן התיעוד של ההיעדר הזה, והתנאי הוא דרישה של המודל: הירח אינו יכול להראות שום סימן לכך שטבעת שחקה אותו — לא החלקה גלובלית, לא מחיקה של מכתשים קטנים שאינה תלויה בסוג הקרקע, ולא אובדן מסה מעבר למה שהבנייה שלו מסבירה.

חלק M — תיארוך

הבעיה

בספרות, גיל של מכתש נקרא מצפיפות המכתשים ומשטף קבוע. **הגישה:** מסדרים את האוכלוסיות לפי הזמן שבו נחתו, בלי להמיר ספירות לשנים.

החלקים שלפני חלק זה שאלו מאין בא החומר החוזר, היכן נחת, באיזו עוצמה, ומה השאיר. חלק זה שואל מתי, והוא עונה בדרך מסוימת. בספרות, גיל של פני שטח נקרא ממספר המכתשים שעליהם. *צפיפות המכתשים* היא מספר המכתשים ליחידת שטח: פני שטח שנחשפו זמן רב יותר אספו יותר מכתשים, כמו שמכונית שחנתה זמן רב יותר מתחת לעץ אספה יותר עלים שנשרו. כדי להפוך את הספירה הזאת לשנים, הספרות מניחה גשם ידוע ויציב של גופים מבחוץ, *שטף קבוע*, המכיל על הדגימות שהביאו המשימות. המאמר הזה מחליף את הגשם הזה. במודל כמעט כל המכתשים נוצרו מחומר חוזר, שהקצב שלו עלה וירד עם הפעילות של הפתחים ושל כדור הארץ; ספירת מכתשים עדיין יכולה לכן לדרג שני משטחים — הצפוף יותר נחשף זמן רב יותר — אבל שום קצב הגעה קבוע אינו יכול להפוך את הספירה לשנים.

מה שהמאמר שומר הוא סדר. את אוכלוסיות המכתשים של החלקים הקודמים אפשר להציב אחת אחרי השנייה לפי מה שמונח על מה ולפי המצב שבו המכתשים נמצאים, בלי לצרף מספר שנים לאף אחת מהן:

- *תחילה*, המכתשים שנוצרו על ידי המקורות של הצד הרחוק שפעלו מוקדם ונקברו אחר כך יחד איתם מתחת לשכבות של הצד הרחוק (D.1§);
- *אחר כך*, המכתשים שנוצרו כשהגוף היה מחובר, שעלו עם הקליפה והם התייעדו של הרמות ושל הצד הרחוק (חלקים B, J–K);
- *אחר כך*, המכתשים שנחתו על הרצפות של הימות כשהרצפות האלה היו עדיין פעילות, ונמסו לתוכן (D.2§, חלק E);
- *לבסוף*, המכתשים החדים על הרצפות הקפואות והמכתשים הקטנים והטריים על היבשה, שנוצרו אחרי השחרור (D.2, §L.7§), יחד עם האוכלוסייה הנלכדת שנקראת בשמה ב-M.1§ להלן.

לשם קנה מידה בלבד: הבנייה כולה נמשכה כ-600 מיליון שנה והסתיימה בשחרור לפני 3.873 מיליארד שנה (מאמר 3); הסדר שלמעלה נופל בתוך פרק הזמן הזה ואחריו, ונקרא בלי לחלק אותו עוד.

M.1 חומר נפלט שנלכד אחרי השחרור

סעיף זה נותן שם לאוכלוסייה האחרונה בסדר הזה, זו שנוצרה אחרי שהירח עזב את כדור הארץ.

החומר שנדון עד כאן חזר אל קליפה שעוד שכבה על גוף האם, ועלה איתה; התייעדו שלו הוא הצד הרחוק. אחריה באה אוכלוסייה שנייה. בשחרור נותק הירח מן הלחץ של כדור הארץ, ואיתו פסקו הלחץ הפנימי של הירח והפליטות של הימות שלו; ימות הצד הקרוב היו אז חמות ובצמיגות נמוכה, וקפאו לאט, מבחוץ פנימה. בצד של כדור הארץ נמשכו ההשלכות, קטנות יותר, כשהירח כבר היה גוף נפרד שמתרחק ממרחק של כמה רדיוסי כדור ארץ. רוב מה שיצא נפל בחזרה אל כדור הארץ; חלק ממנו, שיצא סמוך לתקרה של משוואה (8) ובכיוון הירח, נלכד בכבידה של הירח ונחת עליו. התקרה של משוואה (8) היא מהירות ההשלכה הגדולה ביותר, כ-10.748 ק"מ/ש', שבה החומר עדיין נשאר קשור לכדור הארץ (J.5§); חומר שיוצא מעט מתחתיה מטפס הרחק מכדור

הארץ לפני שהוא חוזר, ואם הירח נמצא בדרכו, המשיכה של הירח עצמו יכולה ללכוד אותו. זה אינו חומר חוזר במובן של חלקים J-K — הוא מעולם לא חזר אל הקליפה — ולכן הוא מקבל כאן שם נפרד: *חומר נפלט נלכד*. המטרה שלו הייתה פני השטח שנחשפו אחרונים, דיסקת המגע והימות שלה (מאמר 11, B.8§); המכתשים המעטים והצעירים שעל הימות נקראים כאן כאוכלוסייה הזאת, החומר הנפלט הנלכד.

שני דברים מבדילים אותו מאסטרואיד. המהירות שלו אצל הירח חסומה מלמעלה במה שנשאר ממהירות המילוט של כדור הארץ אחרי הטיפוס — בסדר גודל של כמה ק"מ/ש' במרחק ירחי של כמה רדיוסי כדור הארץ, ועוד מהירות המילוט של הירח עצמו, 2.4 ק"מ/ש' — מול 15–20 ק"מ/ש' לאסטרואיד; וההרכב שלו הוא של כדור הארץ — החלק הקל של הזרימה, דל בברזל מן הימות (L.6§), בלי יסודות זרים. המהירות השנייה נכנסת לחשבון משום שגוף הנופל על הירח ממרחק גדול מואץ בדרכו פנימה בכבידה של הירח עצמו, ומגיע לפחות במהירות המילוט של הירח. מכאן נובעות התחזיות: על הימות, מכתשים קטנים ביחס למסה שיצרה אותם, לחצי הולם מתחת לתחום האסטרואידי, ופלט דל בברזל מן הים, ללא חתימה זרה. שתי הראשונות נובעות מן המהירות הנמוכה, והשלישית מן המקור. מכתש גדל עם המהירות של מה שיוצר אותו (משוואה (1)), ולכן גוף איטי בעל מסה נתונה חופר מכתש קטן מזה של גוף מהיר. לחץ ההולם גדל בתלילות עם המהירות (משוואה (6)): כ-12.96 ג'יגה-פסקל ב-2 ק"מ/ש' ו-45.56 ג'יגה-פסקל ב-5 ק"מ/ש' בדוגמת הבזלת של J.2§, והרבה יותר במהירויות של אסטרואיד. וגוף העשוי מן החומר הקל של כדור הארץ משאיר פלט דל בברזל מן הים שעליו נחת, וללא חתימה זרה (L.6§). מכתשים בגיל הזה הנושא את תיעוד ההולם של מהירות אסטרואידית אינו שייך לאוכלוסייה הזאת; האוכלוסייה כולה נושאת את ההולם של המהירות הנמוכה. שיעור הלכידה — איזה חלק מן ההשלכות הקטנות של אותו זמן הגיע אל הירח ולא אל כדור הארץ — הוא חישוב מסלולי שנותר לעבודה ההמשך.

מה שיש בידינו עכשיו הוא סדר של אוכלוסיות המכתשים, מן התיעוד הקבור של הצד הרחוק ועד החומר הנפלט הנלכד על הימות, הנקרא מן הסופרפוזיציה ומן המצב ולא מקצב הגעה.

חלק N — סטטיסטיקה

הבעיה

כל השוואה תלויה במה שמושווה למה. **הגישה:** מפרטים את המדגמים, את תחומי הגודל ואת המדדים, יחד עם מה שנמדד ומה שהונח.

חלק זה מפרט כיצד נעשו ההשוואות של המאמר ועד כמה אפשר לסמוך עליהן. שני רעיונות עוברים דרך כולן. הראשון הוא *דומה לדומה*: שתי קבוצות מושוות רק כשהן שונות בדבר האחד הנבדק ודומות בכל דבר אחר שעלול להזיז את התוצאה. המכתשים מושווים בתוך אותו תחום גודל, משום שמכתש גדול רדוד מטבעו ביחס לרוחבו יותר ממכתש קטן; הימות ו-South Pole–Aitken מוסרים משני הצדדים של כל השוואה של הקרקע, משום שים מוחק מכתשים ועשיר בברזל, ומדגם שהכיל יותר ים מן הביקורת שלו היה שונה ממנה מסיבה זו לבדה; והמדגמים נבחרו והוקפאו לפני שנקרא הגודל הנבדק, כך שהבחירה לא יכלה ללכת אחרי התשובה. הרעיון השני הוא *מעבר למקרה*. כל הבדל נמדד מתפזר מעט ממדגם למדגם. הבדל נחשב אמיתי רק כשהוא גדול מן הפיזור הזה: כשמרווח ה-95% שלו — טווח שהיה מכיל את הערך האמיתי ב-95 מכל 100 חזרות — אינו כולל את האפס (להבדל) או את האחד (ליחס), או כשהסתברות לתוצאה חזקה לפחות באותה מידה, אילו לא היה שום אפקט, קטנה.

N.1 כיצד הושוו המכתשים

סעיף זה מתאר את המדידות שעליהן נשענת צורת המכתשים (חלקים I–F, מחקר 6). התחזית השנייה — אחרי הספירה של C.3§ — היא שהנחיתות היו קשות יותר בחצי אחד מאשר בשני (K.4§), ונחיתה קשה יותר צריכה להשאיר מכתש בעל צורה שונה.

התחזית השנייה נקראת על צורת המכתשים. בארבע הכיפות של C.3§, כשהימות ו-South Pole–Aitken מוסרים, נמדדו 1,457 מכתשים של 20–100 ק"מ מקטלוג Robbins [S6] על מודל הגבהים [S7] SLDEM2015, ברזולוציה של כ-60 מ'. מודל הגבהים הוא מפה של גובה פני השטח, הבנויה מאלטימטריית לייזר ומתמונות סטריאו, שבה נקודה מופרדת כל 60 מ' בערך; מכתש של 20 ק"מ נקרא לכן על כמה מאות נקודות לרוחבו. בכל מכתש נמדדו חמישה דברים:

- **השפה:** גובה רכס השפה לאורך 72 אזימוטים, אי הסדירות שלה סביב המעגל והקפיצה שלה מאזימוט אחד לבא אחריו, וההתארכות של השפה;
- **הפסגה המרכזית:** קיימת או חסרה;
- **הרצפה:** החלק של הרצפה שהוא שטוח (שיפוע מתחת ל-2°) והחספוס שלה;
- **שלושת הגבהים של המכתש,** המפורטים להלן;
- **הכימיה בתוך המכתש,** לפי אזורים, במדגם נפרד (L.4§).

72 האזימוטים הם 72 כיוונים סביב המכתש, אחד כל 5°, כך שהשפה נקראת כקו סגור ולא כמספר יחיד. אי הסדירות שלה מודדת כמה הרכס עולה ויורד לאורך הקו הזה, והקפיצה שלה מודדת כמה הוא משתנה מכיוון אחד לבא אחריו: שפה שנשברה בנחיתה קשה היא גם זה וגם זה. שלושת הגבהים הם אלה של A.2§: השפה מעל היבשה, הרצפה מתחת ליבשה, והשפה עד הרצפה.

ההשוואות על המדדים האלה נבנו כך שיהיו דומה לדומה בשלוש דרכים. מכתשים הושוּו רק בתוך אותו תחום גודל (20–30, 30–50 ו-50–100 ק"מ, A.2§). אי הסדירות של השפה והחספוס של הרצפה הושוּו בתוך החצי העמוק יותר של כל תחום, כדי ששפה שהתרככה עם הזמן או רצפה שהתמללה בחלקה לא ייחשבו לנחיתה חלשה יותר. וארבע הכיפות שוות בגודלן ושוכבות על קו המשווה, כך שקו הרוחב, הדוחס מכתשים לכיוון הקטבים, זהה בכל הארבע (C.3§). הבדל בין שני אזורים ניתן כיחס או כהפרש עם מרווח 95% שנמצא בדגימה חוזרת (N.2§); במקום שבו המרווח אינו כולל את האפס, או את האחד ליחס, ההבדל הוא מעבר למקרה. במכתשים של 20–30 ק"מ, למשל, השפות של החצי המוביל אינן סדירות יותר מאלה של החצי המאסף ביחס של 1.25, עם מרווח של 1.00–1.48, והן נמוכות יותר ב-4.5 אלפיות הקוטר, עם מרווח שאינו כולל את האפס (F.1§, מחקר 6).

שאר ההשוואות של המאמר הולכות לפי אותם שני כללים. כל אחת מהן מוצגת במלואה במחקר שלה; הטבלה מרכזת אותן כדי שהקורא יראה, לכל אחת, מה הושווה למה וכיצד הוכרע "מעבר למקרה".

מחקר	מה הושווה, דומה לדומה	כיצד נשפט המקרה
1. ספירה לפי קו אורך (C.3§)	ארבע כיפות שוות על קו המשווה; הימות ו-SPA מוסרים בכל אחת, ובספירה שנייה גם האגנים	יחס הצפיפויות עם המרווח שלו מן הספירות: 1.79 (1.56–2.05); ושוב בדגימה חוזרת של תאים שלמים של 5° על 5°, משום שמכתשים מתקבצים: 1.48–2.19. אף אחד מהם אינו מגיע לאחד
2. מבחן המקור (C.5, §L.1§)	מכתשים סביב שש ימות ושלושה מישורים מול 5,922 ביקורות מותאמות במרחק של יותר מ-600 ק"מ מכל בזלת, כולם נבחרו לפני שנקראה כימיה כלשהי	הירידה של הברזל עם המרחק נקראת מול הביקורות; המכתש מול הקרקע שלו, -0.26 אחוזי משקל FeO בתוך 50 ק"מ, מול -0.01 בביקורות
4. מכתשים מומסים (D.2§)	כל מכתש מול מכתשי רמות בגודלו, כשהבזלת מוסרת ממדגם הרמות; הכלל נקבע על מכתשי הרמות לבדם	מבחן חי בריבוע של טבלת הספירות: הסתברות של כ-3 למיליון שהשיעור המותך עולה לכיוון המגע במקרה
6. צורה לפי קו אורך (חלקים F–I)	אותו תחום גודל; שפות ורצפות בחצי העמוק יותר; כיפות שוות	מרווחי 95% מדגימה חוזרת; הבדל שהמרווח שלו אינו כולל את האפס הוא מעבר למקרה
7. בתוך המכתש (L.4§)	מכתשים ב-90° מערב וב-90° מזרח בזוגות אחד לאחד לפי קוטר, וגם לפי שולי הים וקו הרוחב: 1,214–1,235 זוגות	כל מרווח כולל את האפס: אין הבדל בין החצאים
9. המפזר האחרון (L.7§)	יבשה בלבד, כל ים ו-SPA מוסרים, אותם קווי רוחב, שדות המכתשים המשניים מוסרים משני הצדדים	מרווח מדגימה חוזרת של תאים של 10° על 10°: 1.12–1.27, שאינו כולל את האחד
14. המסה מתחת למכתשים (D.3§)	כל מכתש מול 50 נקודות אקראיות על הרצפה שלו עצמו, באותו גודל	מבחן Wilcoxon: גבוהה יותר ב-13 מתוך 16, הסתברות 0.04

טבלה: ההשוואות של המאמר — מה הושווה למה, וכיצד נשפט המקרה בכל אחת.

שניים מן המבחנים בעלי השם דורשים מילה. *מבחן חי בריבוע* שואל אם השיעורים בטבלת ספירות — כאן שיעור המכתשים המותכים בכל אזור — שונים זה מזה יותר ממה שהמקרה היה גורם אילו השיעור היה זהה בכל

מקום. מבחן Wilcoxon משווה כל מכתש לביקורת שלו עצמו ושואל אם ההפרשים נוטים לכיוון אחד לעתים קרובות יותר ובעוצמה רבה יותר ממה שהמקרה היה גורם; הוא משתמש בדירוגים של ההפרשים, כך שמכתש קיצוני אחד אינו יכול להכריע את התוצאה.

N.2 מה נמדד ומה הונח

כל מדידה נשענת על בחירות, וסעיף זה נותן להן שם, כדי שקורא יוכל לשפוט במה תלויה כל תוצאה.

הפסגה המרכזית ורכס השפה מסווגים בקריאה אוטומטית של מודל הגבהים, לא בבדיקה גאולוגית ידנית; סף הבולטות, חלון החיפוש של השפה, והחיתוכים בין החצי העמוק לרדוד ובין השפות השמורות יותר לשמורות פחות הם אופרטיביים ומפורטים יחד עם הקוד. "אופרטיבי" פירושו שכל קו נקבע לפי כלל מוצהר שנבחר לפני ההשוואה, ולא לפי שיקול דעת שנעשה מכתש אחר מכתש; סף הבולטות הוא כמה התרוממות מרכזית צריכה לבלוט מעל הרצפה כדי להיחשב פסגה, וחלון החיפוש של השפה הוא הרצועה, בין 0.85 ל-1.15 מן הרדיוס (A.2§), שבה מחפשים את הרכס. אותו כלל הופעל על כל אזור, כך שכל שגיאה שהוא נושא, הוא נושא אותה באותה מידה בשני הצדדים של כל השוואה. החצי העמוק יותר המשמש לאי הסדירות של השפה ולחספוס של הרצפה נקרא מן העומק; שלושת הגבהים מושווים לכן על כל המכתשים. בחירת החצי העמוק לפי העומק והשוואת עומקים אחר כך הייתה משווה גודל לעצמו, ולכן הגבהים נקראים על המדגם כולו. טביעת הרגל של הפסגה המרכזית משורטטת בכלל אוטומטי; ב-425 מכתשים היא רחבה או מגיעה לשולי הרצפה, והתוצאות מתקיימות גם בלעדיהם. הסרת המכתשים האלה וקבלת אותה תוצאה מראות שמדדי הרצפה אינם מונעים על ידי פסגות הגולשות אל הרצפה. נתון ההתארכות לקוח מקטלוג Robbins כולו, בלי המסכה.

המרווחים הם מרווחי bootstrap על פני מכתשים; הם אינם ממדלים מתאם מרחבי בין מכתשים שכנים. מרווח bootstrap נמצא על ידי שליפה חוזרת של המדגם מתוך עצמו פעמים רבות, באקראי ועם החזרה, חישוב מחדש של התוצאה בכל פעם, ושמירת 95% האמצעיים של התוצאות. מכתשים שכנים אינם בלתי תלויים לגמרי — מקור אחד מפזר כמה מכתשים במקום אחד — ומרווח המתייחס אליהם כבלתי תלויים יכול להיות צר במקצת מן האמת; מסיבה זו הספירה של מחקר 1 והספירה של מחקר 9 נדגמו מחדש גם לפי תאים שלמים של פני השטח, והמרווחים שלהן נשארו רחוקים מן האחד (N.1§). הכימיה של הטבעות ב-L.4§ נקראת בשברים קבועים של הרדיוס, לא על דופן ורצפה ממופות של כל מכתש, והמרווחים שלה אינם כוללים את פיזור הכיול של המפות. הפיזור הזה הוא 0.81 אחוזי משקל FeO ו-0.43 אחוזי משקל TiO_2 (L.4§), גדול מכל הבדל שנמדד בתוך המכתשים; הבדל קטן ממנו נקרא כ"חומר אחד", לא כמפל שנמדד. פיקסלים של ים בתוך המכתש נשמרו, והוסרו רק מן החומר הנפלט ומן הסביבה. בתוך המכתש לא הוסר דבר, כך שכל מכתש נקרא בשלמותו; החומר הנפלט והסביבה משמשים כקרקע הייחוס, והסרת הים מהם שומרת את הייחוס הזה על היבשה, כפי שכלל הדומה לדומה דורש.

מה שיש בידינו עכשיו הוא מידת האמון לכל תוצאה של המאמר: למה היא הושוותה, על כמה יחידות, וכיצד הוצא המקרה מן החשבון.

חלק 0 — תחזיות ומבחנים

הבעיה

האפשרות של נחיתה מהירה אינה זיהוי של המקור של המכתשים הנצפים. **הגישה:** מגדירים אוכלוסייה נבדקת, וכל טענה מופיעה עם המבחן שלה ועם התוצאה שלה, היכן שנמדדה.

העובדה שחומר חוזר יכול לנחות מהר מספיק כדי ליצור מכתש אינה מראה שהמכתשים הנראים היום נוצרו כך. חלק זה מונה לכן כל טענה של המאמר עם המבחן שקורא אותה. יש בו שני סעיפים: כל טענה עם המבחן שלה (O.1§), והתוצאה של המחקרים של המאמר במבט אחד (O.2§). הדרישות של המודל, ומה שיבחן אותן, מרוכזים במאמר 11 (הדרישות).

0.1 ארבעה-עשר מבחנים ממוקדים

כל שורה בטבלה מנסחת טענה של המודל ואת מה שהיא מניחה, ואת המדידה שבודקת אותה, כך שקורא עם הנתונים הציבוריים יוכל לבצע את המבחן. כמה שורות בוצעו במאמר הזה; שם התוצאה ניתנת בעמודה האחרונה ("נמדד"), עם הסעיף שלה. השאר פתוחות, ועומדות כדרישות על נתונים עתידיים.

תחזית או דרישה	הנחות וציפייה כמותית	מבחן ותוצאה
השלכה, מעבר ונחיתה מהירה	הלחץ מכדור הארץ, בסיוע הנדיפים, מספק $u^2/2$ בפתח; גוף חוזר מרוכז עובר דרך האטמוספירה ופוגש את הקליפה	קישור מודל היציאה של מאמר 3 למסלולים עם גרר והתפרקות ולמשוואת מצב לנחיתה
מגמה בסדרה של אירועים	משוואה (14), רק אחרי קביעת תנאי המקור והגבהים	מדידות הלם ביחידות בעלות גיל ומקור מזוהים; בקרה על חומר, זווית ומיקום בתוך אירוע (עומק במטרה, מרחק ממרכז המכתש); נקראת מול התחום שחוצה אותה גרסה, ולא מול מגמה כללית אחת
מקור ארצי של הגוף החוזר	הרכב מאגר ההשלכה בזמן האירוע תואם את הדיפרנציאציה במאמר 3	מודל ערבוב של גוף חוזר ומטרה, המשתמש בכמה יסודות ובכמה מערכות איזוטופים

הימנות כמקור	המכתשים סביב ים נוצרו מן החומר הנפלט שלו (C.1§)	מכתשים שנבחרו סביב כל ים לפני שהכימיה שלהם נקראה; השיעור הנושא את חתימת התוריום והברזל של הים מול המרחק מן הים, כשחלקו של החומר החוזר נמדד. נמדד (C.5,§) FeO: (L.1) של הקרקע 5.96 אחוזי משקל בתוך 50 ק"מ מול 2.30 בביקורות הרחוקות מכל בזלת — מתאשר ברמת הקרקע — הקרקע סביב ים היא החומר של הים; המכתש עני יותר מסביבתו בכל מרחק (0.26, −, −0.10, −0.05 ו-0.13 − אחוזי משקל FeO ב-0–50, 50–150, 150–300 ו-300–600 ק"מ, מול 0.01 − בביקורות; (L.2§) (גרסה מוקדמת יותר נתנה 7.4 מול 2.4 ו-0.07 עד −0.19)
טבעת הריסוס הפעיל	הימנות שיש על שפותיהן מכתשים קטנים רבים הן העשירות בחומרים נדיפים (C.1§)	מכתשים קטנים על השפה הממופה מול הקרקע שבחוץ, כשהים מוסר משני הצדדים, מול תכולת חומרים נדיפים שנמדדה (מרבצים פירוקלסטיים ומרבצי מעטה כהה, הידרציה) — פתוח
כיפות הזנה קבורות	כיפות ההזנה של הצד הרחוק נקברו בשכבות שלו, יחד עם המכתשים שלהן (D.1§)	שיאי Bouguer עגולים וכיסוי הים שלהם; הרכב פני השטח על הליבה מול הסביבה; הקרום מעל הכיפה. נמדד (D.1§): 44 קבורות, 36 מתוך 40 בצד הרחוק; FeO של הליבה זהה לזה של הסביבה (0.19, −, −0.37 עד +0.14)
קווי האורך	החומר הנפלט של הגוף עצמו נוחת לכיוון החצי המאסף, 90° מזרח, ופוגש את החצי המוביל, 90° מערב, חזיתית (K.4§)	צפיפות המכתשים לפי קו אורך, נקיה (נמדד: 252–249 ב-90° מזרח מול 175–139 ב-90° מערב); סימני עוצמת הנחיתה לפי קו אורך בתוך אותו גודל ואותו חצי עומק (חלקים F–I: יותר פסגות מרכזיות, שפות קטנות משוננות יותר ורצפות מחוספסות יותר ב-90° מערב; אותו גובה שפה ואותה כימיה בתוך המכתש)
המסה הזרה החסרה	גופים פוגעים חיצוניים היו משאירים מסה זרה בקרום העליון; חומר ארצי שחזר אינו משאיר כזו (L.5§)	המסה הזרה שתיעוד המכתשים דורש מול היסודות הסידרופיליים של הקרום; איזוטופי הרתניום של נתי המכתשים. נמדד (L.5§): המכתשים הנראים דורשים 2%–6 מ-5 הק"מ העליונים, הקרום מחזיק 0.9%–2%; הרתניום כשל כדור הארץ

תיעוד הנישא על הקליפה	היווצרות מכתשים לפני השחרור, על הגוף המחובר; חוזק המשמר אותם; אזור המגע מוגדר מראש	תיארוך, יחסי חיתוך, עיוות ומיפוי עם בקרה על קבורה בבזלת; צפיפות לפי המרחק הזוויתי ממרכז הצד הקרוב
גודל ומצב על הימות	חלקים גדולים נחתו מוקדם על ימות חמות ונמסו; חלקים קטנים וקרים נחתו מאוחר על רצפות קפואות ונשארו חדים (E.2–E.5§)	השפה מעל היבשה של המכתשים המרוחים והמותכים על רצפות הימות מול מכתשי רמות באותו גודל, לפי אזור
חומר ארצי אחרי השחרור	החומר מכדור הארץ היה החלק הקל שלו: המכתשים שנוצרו על הימות אחרי השחרור עניים יותר בברזל מן הים (L.6§)	הברזל של החומר הנפלט של כל מכתש על רצפות הימות מול הים שסביבו, לפי גודל, כשעומק החפירה מבוקר
כדור הארץ כמפזר האחרון	המכתשים הקטנים האחרונים באו מכדור הארץ אחרי השחרור, מעט יותר בצד הקרוב (L.7§)	מכתשים טריים של 1–2 ק"מ ליחידת שטח על היבשה, כל ים ו-SPA מוסרים, שדות משניים מוסרים, הצד הקרוב מול הרחוק
רצפות מורמות על הבזלת	נחיתה גדולה על קרקע רכה הרימה את הרצפה, והיא קפאה לפני שחזרה (G.2§)	הרצפה מול הבזלת שממש מחוץ לה, בתיקון הטיה, לפי גודל ולפי צד
הברזל של הרצפות הגבוהות והנמוכות	רצפות שקפאו גבוה היו עשירות בחומרים נדיפים ועניות יותר בברזל מרצפות ששקעו בחזרה (G.3§)	הברזל של כל רצפה מול הגובה שלה ביחס לבזלת שבחוץ

טבלה: ארבעה-עשר מבחנים ממוקדים — כל טענה עם ההנחות שלה, המבחן שלה והתוצאה, היכן שנמדדה.

כיצד לקרוא את השורות שנמדדו. בשורה של הימות כמקור, התחזית מתקיימת: בתוך 50 ק"מ משש הימות הקרקע נושאת 5.96 אחוזי משקל FeO, פי שניים וחצי מ-2.30 של הביקורות, והעודף יורד עם המרחק (C.5§). המכתש עצמו עני במעט מן הקרקע הזאת בכל מרחק (L.2§). בשורה של הכיפות הקבורות, היא מתקיימת גם כן: הברזל מעל 44 הכיפות הקבורות שונה מן הסביבה ב-0.19– אחוזי משקל, והמרווח, 0.37– עד 0.14+, כולל את האפס — פני השטח מעל כיפה קבורה זהים לקרקע שסביבה, כפי שכיסוי המונח מעליה דורש. בשורה של קווי האורך, החצי המאסף נושא 249–252 מכתשים למיליון קמ"ר מול 139–175 בחצי המוביל, ההפך מן העודף בחצי המוביל שגופים מבחוץ היו נותנים. בשורה של המסה הזרה, 5 הק"מ העליונים של הקרום מחזיקים 0.9–2% מסה זרה, מול 2%–6% שהמכתשים הנראים היו דורשים אילו גופים מבחוץ היו יוצרים אותם: במקרה הטוב הקצה הנמוך ביותר של הדרישה, וברוב התחום שלה חלק קטן ממנה.

מה כל מבחן קורא. כל מבחן קורא את מה שהטענה שלו דורשת.

- השלכה, מעבר ונחיתה. המודל זקוק למערכת תנאים אחת שבה האנרגיה שנשארה אחרי ההרמה (משוואה (5)), המעבר דרך האדים (משוואה (7)) ולחץ הנחיתה (משוואה (6)) פועלים כולם יחד; המבחן הוא לקבוע את המערכת המשותפת הזאת.
- מגמה בסדרה של אירועים. משוואה (14) אומרת כיצד מהירות הנחיתה משתנה עם הגובה של המטרה, אבל רק עבור מקור אחד, סיבוב אחד ושדה אחד (K.3§). המבחן קורא מגמה מול מה שגרסה מוצהרת חוזה, לא מול מגמה כללית אחת, שהמודל אינו טוען לה.
- מקור ארצי. החומר החוזר בא מכדור הארץ בשלב ידוע של הדיפרנציאציה שלו (מאמר 3). מודל ערבוב מפריד את החומר של מכתש לחלק של הגוף שנחת ולחלק של המטרה; המבחן מבקש את ההרכב הארצי

שמספק את החלק הראשון.

- **הימות כמקור.** אם הימות השליכו את החומר החוזר, הקרקע שלצידן נושאת את הברזל שלהן, יותר מקרקע רחוקה; זה מה שנמדד (C.5§).
 - **טבעת הריסוס הפעיל.** אם חומרים נדיפים הניעו את הריסוס שבנה את השפות של הימות, הימות העשירות ביותר בחומרים נדיפים — כפי שזה נקרא במרבצים הפירוקלסטיים שלהן, האפר הכהה של התפרצויות נפיצות, ובהידרציה שלהן — נושאות את טבעת המכתשים הקטנים. טבעת כללית על כל שפה לא נמצאה (מאמר 5, M.1§); המבחן על הימות העשירות בחומרים נדיפים לבדן פתוח.
 - **כיפות הזנה קבורות.** כיפה שנקברה מתחת לשכבות של הצד הרחוק נושאת על פניה את הכיסוי, לא את החומר שלה עצמה; לכן הליבה שלה אינה מאפיינת יותר מסביבתה — אינה עשירה יותר בברזל ובמגנזיום — כפי שנמדד (D.1§).
 - **קווי האורך.** החומר הנפלט של הגוף עצמו נפל בחזרה ברכות על החצי המאסף ונפגש חזיתית על ידי החצי המוביל (K.4§); לכן החצי המאסף הוא הצפוף יותר, והנחיתה על החצי המוביל היא הקשה יותר.
 - **המסה הזרה החסרה.** גופים מבחוץ מביאים את היסודות הסידרופיליים — המתכות "אוהבות הברזל" כמו אירידיום ורותרניום, שהקרום של הירח עצמו כמעט חסר אותן — ואיזוטופי הרותרניום מבדילים גוף מבחוץ מכדור הארץ. המודל מצפה לאיזוטופים של כדור הארץ בנתכי המכתשים, ולא ליותר מתכת חיצונית ממה שאבק חלל מספק.
 - **תיעוד הנישוא על הקליפה.** תיעוד המכתשים של הרמות נוצר על הקליפה, שרד, ועלה איתה (מאמר 3). המבחן הוא שזמן היווצרותו, הזמן שבו יכול היה להשתמר זמן העלייה חופפים.
 - **גודל ומצב.** מכתש מותך איבד את השפה שלו יחד עם הרצפה שלו, משום ששקע לתוך קרקע רכה; מכתש מוצף שומר על השפה שלו ורק הרצפה שלו מתמלאת. גובה השפה מבדיל בין השניים.
 - **חומר אחרי השחרור.** מה שהגיע אל הירח מכדור הארץ אחרי השחרור היה החלק הקל של הזרימה החוצה מכדור הארץ (L.6§); לכן, בין מכתשים שחפרו רק לתוך הבזלת, החומר הנפלט עני יותר בברזל מן הים.
 - **המפזר האחרון.** מקור הפונה אל הצד הקרוב משאיר שם יותר מן המכתשים הקטנים האחרונים; המבחן סופר מכתשים טריים של 1–2 ק"מ, הצד הקרוב מול הרחוק, כשהמכתשים המשניים של מכתשי הקרניים הצעירים מוסרים.
 - **רצפות מורמות.** רצפה שהורמה בנחיתה על קרקע רכה וקפאה במקומה יכולה לעמוד בגובה הבזלת שסביבה או מעליה; רצפה שהתמלאה מן הבזלת הזאת אינה יכולה. המבחן קורא כל רצפה מול הבזלת שבחוץ.
 - **הברזל של הרצפות הגבוהות והנמוכות.** רצפה שקפאה גבוה החזיקה את החומרים הנדיפים שלה ואת החומר הקל, וזו ששקעה בחזרה הייתה הצפופה יותר; לכן הרצפות הגבוהות עניות יותר בברזל מן הנמוכות.
- לשורות הכימיות יש תנאי משלהן. ריכוזי היסודות הסידרופיליים חייבים להיגזר ממצב מקור מוגדר. אסור לחזות חוסר ואחר כך לפרש גם שפע כונדריטי כאישור, באמצעות שינוי לא מתועד של מידת הדיפרנציאציה. במילים פשוטות, המודל אינו רשאי לחזות מעט מדי מתכת ואחר כך, אם נמצאת כמות רגילה (כונדריטית, כמו במטאוריט), להסביר אותה בדיעבד על ידי שינוי של המידה שבה כדור הארץ עבר דיפרנציאציה; מצב המקור נקבע תחילה. ההרכב הנמדד של תוצר הנחיתה כולל ערבוב עם חומר המטרה; הוא אינו מתאר את הגוף החוזר לבדו. ההשוואה חייבת לכלול גם גופים פוגעים חיצוניים שעברו דיפרנציאציה, כלומר גופים מבחוץ שהפרידו בעצמם ליבה ולכן נושאים מעט מתכת בחלקיהם החיצוניים.
- הטענה הגאומטרית נשמרת בקצרה: המכתשים המיוחסים לשלב הזה הם תיעוד שעלה עם הקליפה והגיע אל הצד הרחוק ואל השוליים, עם חריג אפשרי באזור המגע. היעדרם על בזלת צעירה אינו מוכיח חריג כזה, ועגילות לבדה אינה טיעון נגד הובלה: מכתש שעלה על הקליפה שמר על צורתו העגולה, ולכן מכתש עגול אינו ראיה נגד

כך שהוא נישא. המכניקה והמיפוי מפורטים במאמרים 3 ו-11; אותה תחזית אינה נספרת כאן כאישור בלתי תלוי נוסף.

מעבר לירח. מנגנון המכתשים של המאמר הזה אינו ייחודי לירח. ירח שנבנה מכוכב האם שלו והשתחרר ממנו נשאר, כל עוד כוכב האם ממשיך להעיף חומר, תחת גשם של חומר שחוזר מאותו כוכב אם; המכתשים שלו נוצרים בעיקר מן החומר הזה, ולא מגופים מבחוץ. לכן אנו חוזים שהמכתשים של כל ירח מסוג זה נושאים את ההרכב של כוכב האם שלו, ולא את זה של גופים מבחוץ. Deimos ו-Phobos, שמאמר 10 קורא אותם כגופים שנורו ממאדים, הם המקרה הראשון: החומר של המכתשים שלהם צריך להיות מאדימי. הדגימות שמשימת MMX עתידה להחזיר מ-Phobos בודקות זאת ישירות: המודל מצפה שהחומר של המכתשים שלו יהיה ברובו מאדימי, ולא יותר חומר מבחוץ ממה שאבק החלל מספק.

0.2 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 התקיימה. מה שלא התקיים מנוסח במחקר שלו ומרוכז כאן.

כיצד לקרוא את הרמזור. הרמזור שופט את ההשערה של כל מחקר 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, מבחן משנה שעוד אינו מעבר למקרה, או חריג עם הסיבה המוצהרת שלו — כשהמגבלה אינה סותרת את ההשערה. ענבר (כתום בטבלה) פירושו שההשערה התקיימה בחלק אחד ולא בחלק אחר, והחלק שלא התקיים מצוין באותה שורה. אדום היה פירושו שההשערה לא התקיימה; אף מחקר במאמר הזה אינו אדום. מספור המחקרים משותף עם מאמר 5. מחקר 13 של המאמר הזה בוטל, ושאר המספרים נשמרים כפי שהם; מחקר 5 משותף עם מאמר 5, שבו הוא מחקר 8 (חלק E). מתוך ארבעה-עשר המחקרים המפורטים, אחד-עשר ירוקים ושלושה כתומים.

רמזור	מחקר	מה התקיים, ומה לא
	1. כמה מכתשים, לפי קו אורך	החצי המאסף מחזיק את מירב המכתשים, מעבר למקרה. ההזזה של התפלגות הגדלים עוד אינה מובהקת
	2. מבחן המקור	הקרקע סביב שש הימות נושאת את הברזל שלהן, היורד עם המרחק, עם עודף עד 600 ק"מ; לצד המישורים, שלא זרקו ולא שפכו דבר, העודף יורד לרמת הביקורות
	3. הכיפות הקבורות והמכתשים הגדולים	אין עודף על הכיפות הקבורות; המכתשים הגדולים באים מימות נראות ומכיפות קבורות כאחד
	4. מכתשים שנמסו לתוך רצפות הימות	שלושה מתוך חמישה מומסים; מכתש חד אחד של 20 ק"מ ומעלה על כל הרצפות; על ימות המגע המכתשים הגדולים נעלמו. רצפות המגע מחזיקות רק שלושה מכתשים

5. גודל ומצב על הימות	פחות מכתשים על הרצפות מאשר על המישורים בכל גודל; השיעור המותר עולה עם הגודל; מכתשים קטנים חדים על המגע
6. השפה, הרצפה והפסגה לפי קו אורך	החצי המוביל נושא את הסימנים של נחיתה קשה, הצד הרחוק את השפות הגבוהות ביותר. כמה מרווחים של השפות של המכתשים הגדולים יותר כוללים את האפס
7. פנים המכתש	חומר אחד מן המרכז עד השפה, זהה בשני החצאים
8. המסה הזרה	הקרום מחזיק חלק קטן ממה שהמכתשים דורשים; הרתנוים ארצי
9. כדור הארץ כמפזר האחרון	המכתשים הקטנים האחרונים רבים יותר בצד הקרוב, כשהמשניים מוסרים
10. הרצפות המורמות	שליש מן הרצפות הגדולות עומדות מעל הבזלת שבחוץ. כמעט כולן שוכבות על המישורים; על רצפות הימות המכתשים הגדולים נעלמו
11. הברזל של הרצפות הגבוהות והנמוכות	הרצפות הנמוכות עשירות יותר בהשוואה המלאה ועל המישורים לבדם. מול הבזלת שממש מחוץ לכל רצפה, ובקבוצות המחמירות יותר, ההבדל אינו מעבר למקרה
12. החומר אחרי השחרור	חומר נפלט עני יותר בברזל מן הבזלת, על רצפות הימות ועל המישורים. בין המכתשים שנשארו בתוך הבזלת ההבדל נופל בתוך פיזור המפות
14. המסה מתחת למכתשים המותכים	יותר מסה מאשר ברצפה שלהם עצמם, ב-13 מתוך 16, בלי השוליים של גוף; אין כזו מתחת למישורים
15. השפה: נשחקה בחום או הוצפה	השפה אבדה, והרכס ששרד הוקהה, בצד של המישור החם רק במגע. ההשוואה המותאמת של צורת הרכס נשענת על ארבעה זוגות

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

שלוש השורות הכתומות מראות מה פירוש "חלק התקיים". במחקר 6 החצי המוביל נושא את הסימנים של נחיתה קשה במכתשים הקטנים, והצד הרחוק את השפות הגבוהות ביותר; אבל לשפות של המכתשים הגדולים יותר, לכמה מן ההבדלים בין האזורים יש מרווחים הכוללים את האפס, ולכן הם עוד אינם מעבר למקרה. במחקר 11 הרצפות הנמוכות נושאות יותר ברזל מן הגבוהות בהשוואה המלאה ועל המישורים לבדם; כשקוראים אותן מול הבזלת שממש מחוץ לכל רצפה, ההבדל קטן יותר (-0.44 מול -0.64 — אחוזי משקל, $G.3\%$) וכבר אינו מעבר

למקרה, וחלק ממנו עשוי לבוא מן היחידות שבהן הרצפות שוכבות. במחקר 12 החומר הנפלט של המכתשים על הבזלת עני יותר בברזל מן הבזלת; אבל בין המכתשים שחפרו רק בתוך הבזלת, ההבדל קטן מפיזור הכיול של המפות, ולכן הקריאה של המודל (חומר קל מכדור הארץ) והקריאה של הספרות (חומר רמות שנחפר מתחת לבזלת) עוד אינן מופרדות. גם שורה ירוקה יכולה לשאת מגבלה: במחקר 1 להזהה של התפלגות הגדלים לכיוון מכתשים קטנים יותר ב-90° מזרח, בגורם של 0.75–0.81, יש מרווח שעדיין כולל את האחד (C.3§), ובמחקר 4 רצפות המגע מחזיקות רק שלושה מכתשים.

חלק P — דיון

הבעיה

התיעודים של המאמר הזה חייבים לספר תהליך אחד. **הגישה:** מחברים יחד את מה ששני החצאים מתעדים, ומנסחים מה נשאר בחוץ ומה חדש.

כל אחד מן החלקים שלפני חלק זה קרא תיעוד אחד של המכתשים: כמה הם, השפה, הרצפה, הפסגה המרכזית, הכימיה, ומצב המכתשים על הימות. חלק זה שואל אם הם מספרים סיפור אחד. קו הטיעון עובר בחמישה צעדים, וכל אחד נשען על תוצאה נמדדת של המאמר:

- המקור. הימות השליכו את החומר החוזר: הקרקע סביבן נושאת את הברזל שלהן, היורד עם המרחק עד 600 ק"מ (C.5, §L.1§).
 - היכן נחת. הגוף הסתובב עם כדור הארץ, ולכן החומר הנפלט שלו עצמו נפל בחזרה ברכות על החצי המאסף ונפגש חזיתית על ידי החצי המוביל (K.4§); החצי המאסף מחזיק את מירב המכתשים (C.3§).
 - באיזו עוצמה. צורת המכתשים מתעדת את הנחיתה: החצי המוביל נושא את הסימנים של נחיתה קשה, הצד הרחוק את השפות הגבוהות ביותר, הצד הקרוב את השפות הנמוכות ביותר ואת הרצפות השטוחות ביותר (חלקים I-F).
 - מה ממלא את המכתש. פנים המכתש הוא חומר אחד, זהה בשני החצאים (L.4§), והמסה הזרה של גופים מבחוץ אינה נמצאת בקרום (L.5§).
 - מתי. רצפות הימות קפאו אחרי שרוב החומר כבר נחת (D.2§, חלק E), והמכתשים הקטנים האחרונים באו מכדור הארץ אחרי השחרור (L.7, §M.1§).
- סעיף P.1 מחבר יחד את התיעודים של שני החצאים; P.2 מנסח מה המאמר משאיר בחוץ; P.3 מנסח מה חדש.

P.1 מה שני החצאים מתעדים

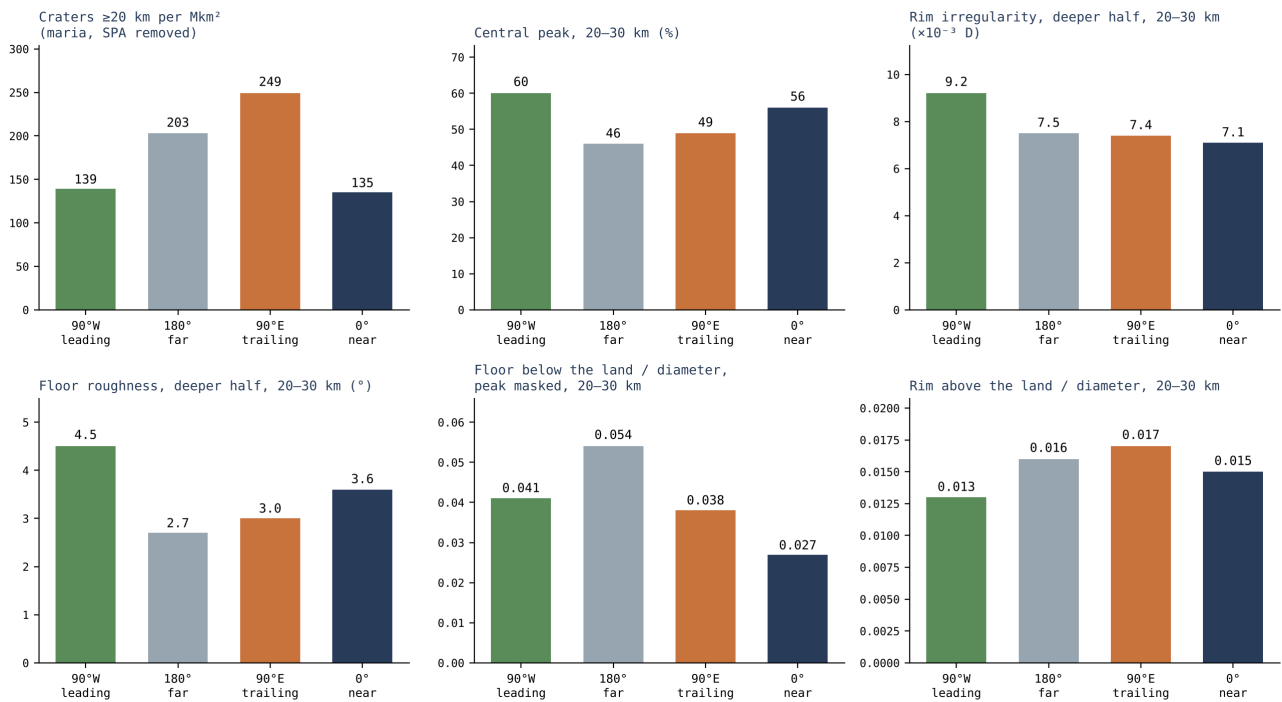
הטבלה מציבה כל תיעוד נמדד לצד הקריאה שהמודל נותן לו. הצבעים הולכים לפי האזורים: השורות הכתומות הן התיעודים שבהם החצי המאסף, 90° מזרח, בולט (המספר והגודל של המכתשים); השורות הירוקות הן סימני הנחיתה הקשה, המצביעים על החצי המוביל, 90° מערב; השורה הכחולה היא הרצפות של הצד הקרוב, שהימות מילאו; השורות האפורות הן הגבהים, שבהם הצד הרחוק והצד הקרוב עומדים בשני הקצוות. ככל שהגוון עמוק יותר, ההבדל חזק יותר.

מה	נמדד	נקרא כ-
מספר המכתשים	90° מזרח 249–252, 90° מערב 139– 175 למיליון קמ"ר (C.3§)	החצי המאסף אסף את החומר הנפלט
גודל המכתשים	90° מזרח לכיוון קטנים יותר, גורם 0.81–0.75	נחיתות רכות יותר ב-90° מזרח
פסגות מרכזיות	הרבה ביותר ב-90° מערב מתחת ל-50 ק"מ (60%-81%); ב-50–100 ק"מ כמעט בכל המכתשים (I.1§)	נחיתות קשות ב-90° מערב

שפות משוננות	90° מערב פי 1.14–1.25 מ-90° מזרח, נחיתות קשות ב-90° מערב	30–20 ק"מ
שפות מוארכות	90° מערב 17%, 90° מזרח 12%	הגעה אלכסונית ב-90° מערב
חספוס הרצפה	90° מערב פי 1.5 מ-90° מזרח, יחד עם הקפיצות של השפה (H.1§)	ההלם של הנחיתה
רצפות שטוחות	השיעור השטוח הגבוה ביותר בצד הקרוב	הימות מילאו אותן מלמטה
הרצפה מתחת לסביבה	הנמוכה ביותר בצד הרחוק, הגבוהה ביותר בצד הקרוב; זהה בשני החצאים (G.1§)	נחיתות חמות ריסקו והתיכו את השכבות של הצד הרחוק; הימות מילאו את הצד הקרוב
גובה השפה	הצד הרחוק הגבוה ביותר; החצי המוביל הנמוך ביותר ב-20–30 ק"מ, העוקב מעליו; הצד הקרוב דחוס (F.1§)	הכוחות ברגע הנחיתה: משיכה החוצה, מפגש חזיתי, נחיתה רגילה, לחיצה
גובה הפסגה	הצד הרחוק הגבוה ביותר, הצד הקרוב הנמוך ביותר (I.1§)	הכוח הצנטריפוגלי, על הפסגות כמו על השפות
הכימיה בתוך המכתש	חומר אחד, מן המרכז עד השפה; זהה ב-90° מערב וב-90° מזרח (L.4§)	המכתש מלא בחומר החוזר שלו

טבלה: מה שני החצאים מתעדים — כל תיעוד נמדד והקריאה שהמודל נותן לו; הגוון מסמן את האזור הבולט ואת עוצמת ההבדל.

שלוש שורות מראות כיצד הטבלה נקראת. בראשונה, הצפיפות ניתנת למיליון קמ"ר (Mkm^2): החצי המאסף נושא בערך פי 1.4 עד פי 1.8 מן המכתשים של 20 ק"מ ומעלה של החצי המוביל, תלוי אם גם האגנים הגדולים מוסרים (C.3§). בשורה של השפות המשוננות, "פי 1.14–1.25" הוא היחס בין הקפיצה של השפה ואי הסדירות שלה בחצי המוביל לאלה של החצי המאסף, במכתשים של 20–30 ק"מ (F.1§). השורה האחרונה, בלי צבע, היא התיעוד היחיד שאינו משתנה מאזור לאזור: עוצמת הנחיתה ניכרת בצורת המכתש ולא במה שמונח בתוכו.



איור 12. ארבעת קווי האורך זה לצד זה (C.3–G.1§): מספר המכתשים, פסגות מרכזיות, אי הסדירות של השפה, חספוס הרצפה, הרצפה מתחת לסביבה וגובה השפה. החצי המוביל 90° מערב (ירוק), הצד הרחוק 180° (אפור), החצי המאסף 90° מזרח (כתום), הצד הקרוב 0° (כחול כהה); הימות ו-South Pole–Aitken מוסרים.

איור 12 מציב את אותם תיעודים זה לצד זה כעמודות, לוח אחד לכל מדד, כך שהקורא יכול לעקוב אחר אזור אחד לאורך כולם: העמודה הירוקה של החצי המוביל נמוכה בספירה וגבוהה בפסגות, באי הסדירות ובחספוס; העמודה האפורה של הצד הרחוק הגבוהה ביותר בשפות והנמוכה ביותר ברצפות; העמודה הכחולה הכהה של הצד הקרוב נמצאת בקצה השני בשני המדדים.

תהליך אחד, שלושה תיעודים. כל חלק של המכתש שומר תיעוד משלו. המרכז מתעד את האנרגיה של הנחיתה: הפסגה המרכזית מתרוממת במקום שבו לנחיתה הייתה אנרגיה מספיקה כדי לקפוץ בחזרה. השפה מתעדת את הכוחות ברגע הנחיתה: מורמת החוצה בצד הרחוק, נלחצת נמוך בחצי המוביל; וגובה הפסגה הולך אחרי השפה. הרצפה מתעדת את הקרקע שעליה נחת החומר: השכבות של הצד הרחוק, מרוסקות ומותכות, הניחו לה לשקוע; הימות של הצד הקרוב מילאו אותה מלמטה. החצאים שונים זה מזה בדרך שהחומר הנפלט של הגוף עצמו חוזה. החצי המאסף, שבו החומר ירד ברכות, אסף את מירב המכתשים ואת הקטנים יותר. החצי המוביל, שבו הקרקע רצה אל תוך החומר הנופל, יש בו פחות מכתשים אבל קשים יותר: יותר פסגות מרכזיות, שפות משוננות ומוארכות, רצפות מחוספסות. הצד הרחוק, שהחומר שהועף ממנו הורם החוצה בסיבוב המשותף והשכבות שלו רוסקו והותכו מתחת לנחיתה, מחזיק את השפות הגבוהות ביותר ואת הרצפות הנמוכות ביותר. הצד הקרוב, הנלחץ אל הקרקע שלו ומתמלא מלמטה בימות הגדולות, מחזיק את השפות הנמוכות ביותר ואת הרצפות השטוחות והגבוהות ביותר. מה שהנחיתה לא שינתה הוא החומר: בתוך המכתש, בכל קו אורך, מונח החומר החוזר שיצר אותו, פרוס באופן אחיד מן המרכז עד השפה.

מומחה עשוי לטעון שהחצי המוביל צריך להיות הצפוף יותר, משום שירח הנע לאורך מסלולו פוגש יותר גופים מבחוץ בצד המוביל שלו; הספרות חוזה שם עודף של כמה עשרות אחוזים [S22, S23]. הספירה הולכת לכיוון ההפוך (C.3§), בפער שהמקרה אינו מסביר, והצורות אומרות מדוע: המכתשים של החצי המוביל מעטים יותר אבל קשים יותר, כפי שקרקע הרצה אל תוך חומר נופל יוצרת אותם, והחצי המאסף מחזיק את הרבים והרכים יותר. שטף מבחוץ נותן עודף בחצי המוביל ואינו נותן שום סיבה למכתשים הרכים יותר של החצי המאסף; החומר הנפלט של הגוף עצמו, הנופל בחזרה על גוף מסתובב, נותן את שניהם.

מה שיש בידינו עכשיו הוא תהליך אחד הנקרא בשלושה תיעודים: היכן נחת החומר, כפי שקבע הסיבוב של הגוף המחובר; באיזו עוצמה נחת, כפי שנכתב במרכז ובשפה; ועל איזו קרקע נחת, כפי שנכתב ברצפה.

P.2 מה נשאר מחוץ למאמר

סעיף זה מנסח את הגבולות של המאמר, כדי שמה שהוא טוען ייקרא בגודלו הנכון.

המאמר הזה אינו קובע את המקור של כל מכתש בודד או של SPA. התפלגות הגדלים של המכתשים נשארת אילוץ שעוד יש לחשב: התפלגויות הגודל והמהירות של החומר המושלך חייבות לעבור דרך מודלים של התפרקות, נחיתה, רוויה וקבורה. התפלגות הגדלים היא כמה מכתשים יש מכל גודל; כדי לחזות אותה מן המודל, יש לשאת את הגדלים והמהירויות של מה שהושלך דרך כל שלב שמשנה אותם – התפרקות במעוף, נחיתה, ומחיקה מאוחרת של מכתשים ישנים על ידי חדשים (רוויה) או על ידי כיסוי. עד שזה ייעשה, ההתפלגות מגבילה את המודל אבל אינה בודקת אותו. אי אפשר להניח לא רוויה בכל תחום גדלים ולא שטף קבוע בזמן שעליו נשענות ספירות המכתשים. השוואה בין גיל רדיומטרי לבין גיל מודל יכולה לבדוק כרונולוגיה, אבל אי התאמה אינה מזהה כשלעצמה מאגמה ארצית: גיל רדיומטרי מתארך את ההתקררות של דגימה, וגיל הנקרא ממכתשים מתארך חשיפה תחת שטף מונח, כך שאי הסכמה ביניהם אומרת שאחת משתי ההנחות שגויה, לא איזה מקור יצר את המכתשים.

אסור להסיק קצב בנייה ממספר המכתשים שנותרו בלי לחשב כמה נמחקו, כמה גופים חוזרים השאירו חומר וכמה גרמו לאובדן. המכתשים הנראים היום הם מה ששרד, לא כל מה שנחת; ספירתם לבדה הייתה נותנת קצב נמוך מדי. חומר מן המקור העמוק שהושלך וחזר נספר במאזן של מאמר 3 פעם אחת. העלייה המאוחרת שלו עם הקליפה אינה הופכת אותו למקור מסה חדש: אותו חומר אינו נספר שוב כשהוא נישא למעלה.

P.3 החידוש והתרומה לסדרה

מעוף בליסטי, היווצרות מכתשים משניים ויחסי הולם הם פיזיקה קיימת [S1–S5]. מעוף בליסטי הוא המסלול של גוף מושלך תחת כבידה בלבד; היווצרות מכתשים משניים היא יצירת מכתשים על ידי חומר שהושלך ממכתש גדול יותר; יחסי הולם, כמו משוואה (6), נותנים את הלחץ של נחיתה מתוך המהירות שלה. המאמר מיישם אותם על השלכה פנימית אל הקליפה של כיפה עולה, ומנסח את הדרישות שהתרחיש חייב לעמוד בהן. התרומה העצמאית שלו היא ההבחנה בין מהירות החזרה לבין הקיבולת של מקור ההשלכה, חישוב המהירות ביחס לפני השטח, והכללת הכבידה של המטרה והמעבר דרך האטמוספירה באילוצי היווצרות המכתשים. במילים פשוטות: המהירות שבה חומר חוזר אינה אותה שאלה כמו כמה הפתח יכול להשליך (J.1§, משוואה (11)); מה שיוצר מכתש הוא המהירות ביחס לפני שטח שהם עצמם מסתובבים (K.2§); ומכתש על גוף האם נוצר תחת הכבידה של גוף האם ואחרי מעבר דרך האדים שלו (C.6, §J.3§), לא תחת הכבידה של הירח היום. המאמר אינו חוזר על בניית הגוף מבפנים, שהיא הנושא של מאמרים 2 ו-3. מה שמאמר 6 מוסיף לסדרה הוא תיעוד המכתשים הנקרא כתיעוד של הימות ושל כדור הארץ: המקור של המכתשים, המיון של הנחיתות שלהם על ידי הסיבוב של הגוף המחובר, והסדר שבו קפאו הרצפות.

חלק Q — 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 המכתשים; החלק או הסעיף המצוין בסוגריים הוא המקום שבו החישוב או המדידה והמבחן שלהם מוצגים במלואם.

המאמר יצא לענות על שאלה אחת: אם המכתשים של הירח לא נחפרו על ידי גופים מבחוץ, מה יצר אותם, ומה הם מתעדים? התשובה שלו היא שמכתש הוא המקום שבו נחת חומר חוזר — חומר שהושלך החוצה מן הפתחים, הימות, וחזר מטה בכוח הכבידה — וחלקי המאמר בחנו את התשובה הזאת בשתי דרכים. חמש המסקנות הראשונות עוסקות בפיזיקה של הנחיתה עצמה: באיזו מהירות החומר חוזר, איזה לחץ הוא יוצר, ומה המקור צריך לספק כדי שהדבר יקרה (חלקים J ו-K). ארבע האחרונות עוסקות בתיעוד שעל הירח היום: המסה הזרה שהמכתשים היו צריכים להשאיר ולא השאירו, הימות כמקור, המכתשים שאבדו, וההבדל בין קווי האורך (חלקים C-I ו-L). מסקנה 6 מחברת בין השתיים: היא מונה את המבחנים שמכריעים אם אוכלוסיית המכתשים שייכת למנגנון.

Q.1 מה המאמר הראה

1. **גוף חוזר נוחת במהירות שבה הושלך (K.1§).** בשדה המרכזי שנבדק, חומר החוזר אל פני שטח מסתובבים באותו רדיוס נוחת במהירות יחסית השווה למהירות ההשלכה. חזרה בכוח הכבידה אינה מחייבת נחיתה איטית. הסיבה פשוטה: החומר יוצא עם המהירות של פני השטח המסתובבים ועוד מהירות עלייה משלו u ; כשהוא חוזר לאותו מרחק מן המרכז, הכבידה החזירה לו בדיוק את המהירות שלקחה ממנו בזמן הטיפוס, ופני השטח שמתחתיו עדיין מסתובבים באותו קצב, כך שההבדל היחיד שנשאר בין השניים הוא המהירות u (משוואה 11). חומר שהושלך ב-2, 3, 5 או 8 ק"מ/ש' חוזר ב-2, 3, 5 או 8 ק"מ/ש'. **המשמעות**: הנפילה חזרה אינה מרככת את הנחיתה. חומר שהושלך מן הפתחים חוזר במלוא המהירות שבה הושלך, וזה מספיק כדי ליצור מכתש; לכן השאלה אינה אם חומר חוזר יכול ליצור מכתשים, אלא אם המקור יכול להשליך אותו מהר מספיק (מסקנה 3).

2. **במהירויות האלה הנחיתה יוצרת לחצי הלם של עשרות ג'יגה-פסקל (J.2§).** בדוגמה האידיאלית של בזלת, 2–5 ק"מ/ש' נותנות הערכות של לחץ מגע של כ-13–46 ג'יגה-פסקל (12.96 ג'יגה-פסקל ב-2 ק"מ/ש', 45.56 ג'יגה-פסקל ב-5 ק"מ/ש', מן ההתנהגות המדודה של בזלת תחת הלם [S3]). אלה לחצים בנקודת המגע בנחיתה חזיתית של חומר על חומר זהה, ולא לחצים על פני המכתש כולו. התוצאה דורשת התאמה של החומר ושל הגאומטריה לפני שמיישמים אותה על דגימה ירחית. **המשמעות**: נחיתה של חומר חוזר בכמה ק"מ/ש' היא אירוע הלם, מן הסוג שמשאיר תיעוד במינרלים; היא אינה שקיעה עדינה. כדי להשוות את המספר לדגימה ירחית מסוימת, יש להכניס את זוג החומרים בפועל (למשל חומר מותך הנוחת על הקליפה הקרה יותר), את זווית ההגעה ואת הנקבוביות; זהו שלב מוצהר של המבחן, ולא חולשה של התוצאה.

3. **המקור חייב להשליך את החומר מהר, החומר חייב לחצות את האדים, והוא חייב להגיע בשלמותו (J.1, J.3, J.5§).** מהירות היציאה, המעבר דרך האטמוספירה וההישרדות של גוף חוזר קוהרנטי — גוף אחד שלא התפרק — הן שלוש הדרישות שהמבחן הזה מעביר למאמר 3. כדי להשליך קילוגרם אחד ב-2–8 ק"מ/ש' נדרשים 2–32 מגה-ג'אול (משוואה 5). הלחץ מכדור הארץ מספק אותם: הסיבוב והמיון יוצרים את

הלחץ בפנים כדור הארץ, והוא עובר דרך האגס אל הפתחים ומתיז מהם את החומר. הגז המומס בנתך — החומרים הנדיפים, בעיקר מים — מסייע: כשהנתך עולה והלחץ עליו יורד, הגז מתפשט ומוסיף את דחיפתו, כמו בקבוק שנוער ודוחף החוצה את תכולתו כשפותחים אותו. חשבון האנרגיה המלא, לאחר מחירי ההרמה, הזרימה ונשיאת העומס (עלות ההרמה של 139.78 ג'יגה-פסקל במאמר 3), הוא דרישה של המודל. בדרך חזרה הגוף חייב לחצות את אטמוספירת האדים של התרחיש; גוף בקוטר קילומטר אחד החוצה עמודה של 100 בר שומר על כמחצית ממהירותו (J.3§). וחומר שהושלך מהר יותר ממהירות הבריחה, כ-10.7 ק"מ/ש' בדוגמה, אינו חוזר כלל (J.5§). המשמעות: שלוש הדרישות מגדירות חלון אחד — מהר מספיק כדי ליצור מכתש, לאט מספיק כדי להישאר קשור, גדול וצפוף מספיק כדי לחצות את האדים — והלחץ מכדור הארץ, בסיוע החומרים הנדיפים, חייב לספק את החלון הזה. החומרים הנדיפים גם מסייעים להשלכה וגם מעבים את האטמוספירה שהגוף חייב לחצות; תחום אחד של תנאים חייב לספק את שניהם, וכך הדרישה מועברת למאמר 3.

4. **מגמת הלם או תקרת הלם תלויות במסלול, ולא במקור לבדו (K.3, J.5§).** מגמת הלם יורדת ותקרת הלם מספרית שייכות למסלול ולמקור מוגדרים; הן אינן חתימות כלליות של כל חומר ארצי חוזר. מהירות הנחיתה יורדת עם הגובה עד רדיוס הקורטציה — המרחק שבו גוף שמסתובב עם כדור הארץ כבר נע במהירות של מסלול חופשי (כ-15,883 ק"מ בנתוני השלב המוקדם כאן) — ועולה מעבר לו (משוואה 14); אבל אם סדרה של דגימות מראה מגמה בזמן תלוי באופן שבו מהירות ההשלכה, הסיבוב, המטרה והזווית השתנו בין אירוע לאירוע. המשמעות: מספר הלם יחיד אינו יכול לאשר את המקור הארצי או לשלול אותו. גרסאות קודמות של הסדרה נתנו תקרות של 113 או 97 ג'יגה-פסקל ומגמה של 102 → 86 ג'יגה-פסקל; אלה היו תקפות למשפחה אחת של מסלולים, ודגימה שמעל תקרה כזאת אינה מוציאה כשלעצמה את המקור. לכן המבחן מנוסח לכל מסלול ולכל מקור (O.1§, "מגמה בסדרה של אירועים").

5. **מכתש שנוצר על גוף האם חייב להיות מחושב בתנאים של גוף האם (C.6, J.4§).** יצירת מכתשים על גוף האם מחייבת להשתמש בכבידה ובראולוגיה של המטרה באותו זמן, ואחר כך לחשב את השימור ואת ההעברה לפי מאמר 3. ראולוגיה היא האופן שבו הקרקע זורמת או נשברת תחת עומס — אם היא מתנהגת כמוצק נוקשה או כמוצק רך הזורם לאט. על גוף האם הכבידה הייתה כ-8.25 מ"ש², פי חמישה מזו של הירח היום; אותו מכתש שם דורש גוף חוזר כבד פי כמה מאשר על הירח עכשיו (C.6§). פני השטח הקולטים חייבים גם להיות עבים וחזקים מספיק כדי לשמור על מכתש בגודל כזה, והמכתש חייב לעבור, יחד עם הקליפה שהוא שוכב עליה, אל המקום שבו הוא נראה היום (מאמר 3). המשמעות: אי אפשר לקרוא את המכתשים של הצד הרחוק בעזרת חוקי ההתאמה (scaling) של הירח של היום בלבד. כל מכתש בתיעוד עבר שלושה שלבים — הוא נוצר על גוף האם, הוא שרד, והוא עלה עם הקליפה — וכל שלב הוא חלק מן החישוב.

6. **המאמר מגדיר את המבחן, והמבחנים של O.1§ מכריעים את הייחוס.** למאמר 6 יש תפקיד עצמאי: הוא מגדיר מבחן לנחיתה של החומר החוזר. ייחוס אוכלוסיית המכתשים למנגנון מוכרע על ידי המבחנים של O.1§, וביניהם — ההשלכה והמעוף, המגמה בסדרה של אירועים, המקור הארצי, הימות כמקור, טבעת הריסוס הפעיל, כיפות ההזנה הקבורות, קווי האורך, המסה הזרה החסרה, והתיעוד הנישא על הקליפה — כל אחד מנוסח יחד עם מה שהוא קורא. המשמעות: הפיזיקה של חלקים J-K מראה שהנחיתה יכולה לקרות; המדידות של חלקים C-I ו-L מראות אם היא קרתה. כמה מן המבחנים האלה כבר הורצו — הימות כמקור, כיפות ההזנה הקבורות, קווי האורך והמסה הזרה החסרה — והתוצאות שלהם הן ארבע המסקנות הבאות. כל מבחן קורא את המדידה שלו, כך שהייחוס נבדק מדידה אחר מדידה.

7. **המכתשים אינם נושאים מסה זרה (L.5§).** המסה הזרה אינה שם. כשקוראים אותם כגופים פוגעים חיצוניים, המכתשים הנראים דורשים עד פי 6.7 מן המסה הזרה שהקרום מכיל, וההפצצה כולה של הספרות — פי ארבעה-עשר עד שמונה-עשר ממה שהקרום והמעטפת מכילים (גרסה קודמת נתנה "עד פי שישה" ו"פי

שבעה עד שבעה-עשר"); הספרות סוגרת את הפער בהנחה שכ-93% מן המסה שנמסרה נעלמו. הרתניום של נתכי המכתשים הירחיים, היכן שנמדד, הוא של כדור הארץ (L.5§). המדד הוא היסודות הסידרופיליים במיוחד — אירידיום, אוסמיום, פלטינה, רותניום, היסודות "אוהבי הברזל" שירדו לליבה כשהירח נפרד לשכבות, כך שהקרום כמעט אינו מכיל כאלה משלו וכל תוספת מבחוץ בולטת. בקריאה של פגיעות, המכתשים הנראים דורשים 4.4×10^{19} – 5.0×10^{19} ק"ג של מסה זרה, 2%–6% מ-5 הק"מ העליונים של הקרום; הקרום מכיל לכל היותר 0.9%–2%. ההפצצה כולה של הספרות דורשת 3.7×10^{20} ק"ג; הקרום והמעטפת יחד מכילים 2.1×10^{19} – 2.7×10^{19} . הספרות מגשרת על הפער בשיעור שימור נמוך (חמישית במקום כשלוש חמישיות) ובאובדן לליבה לפני כ-4.35 מיליארד שנה. האיזוטופים של רותניום מראים מאיזה מאגר של מערכת השמש הגיע היסוד, ובשתי הדגימות שנמדדו הם תואמים לסיליקט של כדור הארץ [S14]. המשמעות: בקריאה של פגיעות יש להניח את היעלמות המסה החסרה, מכתש אחר מכתש. במודל אין מה להסביר: החומר שיצר את המכתשים היה של כדור הארץ, מאותו סוג כמו הקליפה שעליה נחת, והיסודות הסידרופיליים שלו נושאים את האיזוטופים של כדור הארץ.

8. **הימות הם המקור, והמכתשים אבדו בשתי דרכים (C.1, C.5, L.1; D.1–D.2§).** הימות הם המקור של החומר החוזר: הקרקע סביב כל ים נושאת את הברזל והטיטניום שלו, ההולכים ופוחתים עם המרחק (C.1§); נמדד ב-C.5§ וב-L.1§). סביב ששת הימות שנבדקו, תחמוצת הברזל (FeO) של הקרקע היא 5.96 אחוזי משקל בתוך 50 ק"מ מן השפה, לעומת 2.30 אחוזי משקל במכתשי ביקורת הנמצאים יותר מ-600 ק"מ מכל בזלת, והיא נשארת מעל הביקורת עד 600 ק"מ. מכתשים אבדו פעמיים: בצד הרחוק, נקברו יחד עם המקורות שיצרו אותם (D.1§), ועל הקרקעיות של הימות הם נמסו — 49 מתוך 79 מכתשים של 10 ק"מ ומעלה, עם מכתש חד אחד של 20 ק"מ ומעלה על 1.2 מיליון קמ"ר, לעומת 207 למיליון קמ"ר ברמות (D.2§); על הימות של המגע הגדולים נעלמו לגמרי (D.2§). על 703,000 הקמ"ר של הקרקעיות של הימות של המגע לא נשאר אף מכתש אחד של 20 ק"מ ומעלה. המשמעות: ים אינו מטרה שאספה מכתשים, אלא מקור שהשליך חומר סביבו — הברזל גבוה ביותר ליד הים ומתדלדל כלפי חוץ, הסימן של מקור. אותה פעילות שיצרה את המכתשים גם מחקה אותם: בצד הרחוק המקורות כוסו בשכבות שהם וגוף האם הניחו, והמכתשים שקעו מתחתן יחד איתם; על הימות הפתוחים המכתשים נחתו על קרקעית חמה ונמסו לתוכה, כשלושה מתוך חמישה (62%). המכתשים שנראים היום הם התיעוד האחרון שנכתב, ולא הראשון.

9. **שני החצאים של הירח מתעדים את ההשלכה של הגוף עצמו (חלקים F–I, §K.4).** קווי האורך מתעדים את ההשלכה של הגוף עצמו: החצי המאסף, 90° מזרח, הוא הצפוף יותר, והחצי המוביל, 90° מערב, הוא זה שנחתו עליו בעוצמה הרבה ביותר — יותר פסגות מרכזיות, יותר שפות משוננות במכתשים הקטנים, קרקעיות מחוספסות יותר; לצד הרחוק השפות הגבוהות ביותר, לחצי המוביל הנמוכות ביותר; לצד הקרוב, בגלל הימות, הקרקעיות השטוחות והגבוהות ביותר; ובתוך המכתש, בכל קו אורך, חומר אחד. המרכז מתעד את האנרגיה של הנחיתה, השפה את הכוחות שפעלו באותו רגע, הקרקעית את הקרקע שמתחת (חלקים F–H). החצי המוביל הוא החצי הפונה אל כיוון התנועה של הירח במסלולו, שמרכזו ב- 90° מערב; החצי המאסף פונה לאחור, ומרכזו ב- 90° מזרח. צפיפות המכתשים, כשהימות ו-South Pole–Aitken מוסרים משני הצדדים, היא 249–252 למיליון קמ"ר ב- 90° מזרח, לעומת 139–175 ב- 90° מערב. חומר שהושלך מן הגוף המחובר והמסתובב במהירות הבריחה שלו או פחות נפל חזרה עליו, והסיבוב קבע היכן ובאיזו עוצמה: על החצי המאסף הוא ירד בעדינות ולעתים קרובות, על החצי המוביל הקרקע רצה לתוכו חזיתית, כמו רץ שפוגש את הגשם בפניו ולא בגבו. המשמעות: ההבדל בין החצאים אינו הבדל במה שנפל, שכן החומר בתוך המכתש זהה בכל קו אורך, אלא באופן שבו הוא נחת. תהליך אחד, הנקרא בשלושה חלקים של כל מכתש, נותן תמונה עקבית על פני הירח כולו.

יחד, תשע התוצאות מתארות תהליך אחד הנראה משני צדדים. הפיזיקה מראה שחומר שהושלך מן הפתחים חוזר במהירות שבה יצא, יוצר לחצי הלם של עשרות ג'יגה-פסקל, ודורש מקור שמשליך אותו מהר מספיק וגוף

שחוצה את האדים בשלמותו. התייעוד מראה שהימות היו המקור, שתיעוד המכתשים נכתב ונמחק על ידי אותה פעילות, שהמכתשים אינם נושאים מסה זרה, ושעל שני החצאים של הירח נחת חומר באופן שהסיבוב של הגוף עצמו חוזה. המבחנים המכריעים הם אלה של $O.1\%$, כל אחד עם המדידה שלו.

נספח — שחזור ומפת החידוש

לנספח הזה שתי מטרות. הראשונה היא לאפשר לכל קורא לחשב מחדש את טבלת המעוף של K.1§ מן הקלטים המוצגים במאמר, צעד אחר צעד. השנייה היא לומר, עבור כל רכיב של המאמר, אם הוא ידע קיים, השערה של המודל, או חישוב של המאמר הזה.

שחזור טבלת המעוף

טבלת המעוף של K.1§ נותנת, לכל מהירות השלכה u , את הגובה שהחומר מגיע אליו, את הזמן שהוא נמצא במעוף, את המרחק מערבה מנקודת המוצא שבו הוא נוחת, ואת מהירות הנחיתה שלו. בין היציאה לחזרה החומר נע רק תחת הכבידה של גוף האם, ולכן המסלול שלו הוא קטע של אליפסה שמרכזו של גוף האם נמצא באחד ממוקדיה — מסלול קפלרי. המתכון שלהלן מוצא את האליפסה הזאת מתנאי ההתחלה, ואחר כך קורא ממנה את המעוף. הסמלים הם אלה של משוואה (10): $\mathcal{E}$ היא האנרגיה המסלולית הסגולית (אנרגיה לקילוגרם; ערך שלילי פירושו שהחומר קשור וחייב לחזור), ℓ הוא התנע הזוויתי הסגולי ("כמות הסיבוב" לקילוגרם, שכבידה המכוונת אל המרכז אינה יכולה לשנות), $K = GM_0$ הוא עוצמת הכבידה של גוף האם, $r_0 = 6,721$ ק"מ הוא רדיוס ההשלכה, ו- ω הוא קצב הסיבוב של פני השטח.

לכל u בטבלה מחשבים ממשוואה (10):

$$a = -\frac{K}{2\mathcal{E}}, \quad e = \sqrt{1 + \frac{2\mathcal{E}\ell^2}{K^2}}, \quad n = \sqrt{\frac{K}{a^3}}.$$

כאן a הוא הציר הראשי למחצה, מחצית הציר הארוך של האליפסה; e הוא האקסצנטריות, מידת המתיחה (15) של האליפסה (0 למעגל, מתקרבת ל-1 למסלול מוארך מאוד); ו- n הוא התנועה הממוצעת, הקצב הזוויתי הממוצע שבו החומר היה מקיף את האליפסה כולה. ככל שההשלכה מהירה יותר, $\mathcal{E}$ קרובה יותר לאפס, האליפסה גדולה ומוארכת יותר, והתנועה הממוצעת איטית יותר.

בנקודת היציאה העולה:

$$f_0 = \arccos\left(\frac{\ell^2 / (Kr_0) - 1}{e}\right), \quad E_0 = \arccos\left(\frac{1 - r_0/a}{e}\right).$$

שתי הזוויות ממקמות את נקודת היציאה על האליפסה. f_0 , האנומליה האמיתית, היא הזווית בפועל במרכז, (16) בין הנקודה הנמוכה ביותר של האליפסה לבין נקודת היציאה; E_0 היא אנומליה אקסצנטרית, ולא האנרגיה $\mathcal{E}$. האנומליה האקסצנטרית היא זווית עזר שמקלה על חישוב הזמן לאורך אליפסה (משוואת קפלר). החומר יוצא ב- f_0 , עובר דרך הנקודה הגבוהה ביותר של האליפסה ב- $f = \pi$, וחוזר לאותו רדיוס בנקודת המראה $2\pi - f_0$. זמן החזרה וההיסט מערבה על פני השטח הם:

$$t_f = \frac{2(\pi - E_0 + e \sin E_0)}{n}, \quad s_W = r_0 [\omega t_f - (2\pi - 2f_0)].$$

במילים: זמן המעוף t_f הוא הזמן שלוקח לעבור מנקודת היציאה אל נקודת המראה שלה, והוא ניתן על ידי (17) משוואת קפלר. ההיסט מערבה s_W משווה בין שתי זוויות במשך הזמן הזה: הזווית שפני השטח מסתובבים, ωt_f , והזווית שהחומר עובר סביב המרכז, $2\pi - 2f_0$. פני השטח מסתובבים רחוק יותר, ולכן החומר יורד מערבה מן הנקודה שממנה יצא, בהפרש בין הזוויות כפול הרדיוס.

גובה השיא הוא $r_0 - a(1+e) : a(1+e)$ הוא המרחק של הנקודה הרחוקה ביותר של האליפסה מן המרכז, ו- r_0 מופחת כדי לקבל את הגובה מעל רדיוס ההשלכה. במעופים ארוכים יש להבחין בין הזווית המצטברת לבין מיקום על פני השטח מודולו 2π — אחרי סיבוב שלם של פני השטח אותה נקודה חוזרת — אבל הערכים שבטבלה אינם דורשים תיקון כזה. אין תקרת מעוף כללית של 44 שעות: בגבול $\mathcal{E} \rightarrow 0^-$ זמן המעוף בקירוב הקפלרי יכול לגדול ללא גבול, משום שכאשר האנרגיה מתקרבת לערך הבריחה האליפסה גדלה ללא גבול, וכך גם הזמן לעבור לאורכה. ההפרעות של המערכת האמיתית — הגוף המתפתח, צורת השדה, האדים — מגבילות את התקפות של הקירוב.

הערכת Hill משתמשת ב- $r_H = a_{\text{EL}} (M_L/3M_E)^{1/3}$, ובמהירות ההשוואה $\sqrt{2GM_L (1/R_b - 1/r_H)}$. רדיוס Hill r_H הוא המרחק סביב הירח שבתוכו הכבידה של הירח עצמו מחזיקה גוף קטן כנגד משיכת הגאות של כדור הארץ; a_{EL} הוא המרחק בין כדור הארץ לירח, M_L ו- M_E המסות של הירח ושל כדור הארץ, ו- R_b הרדיוס של הגוף. מהירות ההשוואה היא המהירות של נפילה ממנוחה ב- r_H אל פני השטח של הגוף; בנקודת הייחוס המאוחרת של J.5§ (17,631 ק"מ) היא נותנת $r_H \approx 2,822$ ק"מ וכ-1.31 ק"מ/ש'. זוהי הערכה של מסלול מעגלי עם שדה ירחי מבודד בתוך האינטגרל, ולא פתרון של בעיית שלושה גופים.

מפת החידוש

הטבלה שלהלן מפרידה בין מה שהמאמר לוקח מאחרים לבין מה שהוא מוסיף. יש לקרוא אותה מלמעלה למטה: שלוש השורות הראשונות הן ידע קיים — מכתשים משניים שנוצרו על ידי חומר חוזר, העברה של חומר מכדור הארץ אל הירח, והפיזיקה של הלם ושל התאמת מכתשים — ומובאים עם המקורות שלהם. השורה הרביעית היא ההשערה של המודל עצמו, שהמאמר הזה ומאמר 3 בוחנים. החמישית היא החישוב של המאמר הזה, התקף לקלטים המוצהרים. השורה האחרונה היא הקריאה של המודל את המכתשים הנצפים: שהם באו מן המקור הזה. חישוב המעוף לבדו אינו מבסס אותה; המדידות של חלקים C-I ו-L תומכות בה, מחקר אחר מחקר — הספירה לפי קווי אורך (מחקר 1), מבחן המקור (מחקר 2), המכתשים שהותכו לתוך רצפות הימות (מחקרים 4 ו-5), צורת המכתשים לפי קווי אורך (מחקר 6), פנים המכתש (מחקר 7), המסה הזרה החסרה (מחקר 8) וכדור הארץ כמפזר האחרון (מחקר 9) — כפי שמסקנה 6 קובעת ו-0.2§ מרכז.

רכיב	סיווג
חומר חוזר היוצר מכתשים משניים	ידע קודם — S1
העברה של חומר מכדור הארץ אל הירח	ידע קודם — S2
הלם והתאמת מכתשים	פיזיקה סטנדרטית — S3–S5
פליטה מן הפתחים של הגוף המחובר, בלחץ שעבר מכדור הארץ דרך האגס, וחזרה של החומר אל הגוף	השערת LEF, הנבחנת כאן ובמאמר 3
טבלאות המעוף, האנרגיה והרגישות	העבודה הזאת — חישובים המותנים בקלטים המפורטים
ייחוס המכתשים הנצפים למקור הזה	קריאת LEF — נתמכת במחקרי המאמר הזה (מחקרים 1, 2, 4–9; 0.2§)

מפת החידוש: מה המאמר לוקח מידיע קיים, מה הוא השערת המודל, ומה הוא חישוב של המאמר הזה.

עבודה נוספת – פתחים למחקר

שבעת הפריטים שלהלן הם המקומות שבהם החישוב או המדידה הבאים יחזקו את התמונה או יבחנו אותה. ארבעת הראשונים משלימים את הפיזיקה של הנחיתה – מה המקור משליך, מה חוצה את האדים, ומה הנחיתה עושה למטרה חמה ושכבתית; שלושת האחרונים מרחיבים את התיעוד המדוד. נושאי המחקר הרחבים יותר של הסדרה מרוכזים במאמר 12 (נושאי מחקר).

1. **חומר מושלך שנלכד.** שיעור הלכידה של חומר ארצי שהושלך אחרי השחרור על ידי ירח הנמצא במרחק של כמה רדיוסי כדור ארץ, כפונקציה של מהירות ההשלכה ושל כיוונה; ותיעוד ההלם והגודל על הימות שמפריד אותו מגופים מאוחרים יותר שבאו מבחוץ (M.1§). אחרי השחרור כדור הארץ המשיך להשליך חומר; רובו נפל חזרה אל כדור הארץ, וחלק נלכד בכבידה של הירח. כמה גדול היה החלק הזה הוא חישוב מסלולי, והתשובה שלו קובעת כמה מן המכתשים הצעירים המעטים שעל הימות צפויים לבוא מן האוכלוסייה הזאת.
2. **מהירות היציאה מן הפתחים.** אנרגיית ההשלכה באה מן הלחץ מכדור הארץ, בסיוע החומרים הנדיפים (J.1§). מודל של דקומפרסיה נפיצה של נתך עשיר בנדיפים, בלחצי המקור של מאמר 3, ייתן את התפלגות מהירויות היציאה, ומכאן את חלק החומר שחוזר ב-2–8 ק"מ/ש'. דקומפרסיה נפיצה היא ההתפשטות הפתאומית של גז מומס כשהלחץ על נתך יורד; זהו הגודל שהופך את דרישה 3 של המסקנות למספר.
3. **המעבר דרך אטמוספירת הקיטור.** מסלולים מצומדים של כבידה וגרר, לגופים של 0.1–10 ק"מ דרך אטמוספירה הידרוסטטית של 10–1,000 בר, עם התחממות והתפרקות, יקבעו אילו גופים חוזרים מגיעים אל הקליפה בשלמותם (J.3§). הדוגמה של J.3§ טיפלה בגרר בלבד, לגוף אחד בלחץ אחד; החישוב המלא עוקב אחר הכבידה והגרר יחד, על פני טווח הגדלים והלחצים.
4. **הלם במטרה חמה ושכבתית.** התאמת עכבה (impedance matching) לגוף חוזר צפוף על קליפה סיאלית קרה מעל בסיס נייד, והתאמת המכתשים הנובעת ממנה ב- $g = 8.25 \text{ מ"ש}^2$, יחליפו את ההערכה של בזלת על בזלת של J.2§. התאמת עכבה היא החישוב של האופן שבו לחץ ההלם מתחלק במגע בין שני חומרים שונים, והוא תלוי בצפיפות ובקשיחות של כל אחד מהם; הקליפה הסיאלית היא הקרום הקל, העשיר בצורן ובאלומיניום, של גוף האם.
5. **התיעוד של קווי האורך.** ביקורת ידנית של הפסגות המרכזיות ושל השפות בארבע הכיפות של N.1§, החיבור לקטלוג זרימות הנתך הירחיות [S8], ואותם מדדים לפי גיל המכתש, יקבעו כמה מן ההבדל בין 90° מערב ל- 90° מזרח הוא עוצמת הנחיתה וכמה הוא הימות. המדדים של חלקים F–I נעשו באופן אוטומטי על מודל הגבהים; בדיקה שלהם בעין, והוספת זרימות הנתך שנחיתה קשה מייצרת, מפרידות בין שתי הסיבות.
6. **חתימות סידרופיליות.** מודל ערבוב של גוף חוזר ארצי ומטרה ארצית עבור נתכי הנחיתה העתיקים ביותר, כדי להבחין בין חומר חוזר לבין גופים פוגעים אסטרואידיים לפי הדפוסים של היסודות הסידרופיליים שלהם. מאחר שבמודל גם הגוף החוזר וגם המטרה ארציים, הנתך צריך לשאת דפוס אחד; גוף אסטרואידי היה מוסיף דפוס שני, זר. המכתשים הבודדים בעלי גודל ידוע שנזכרו ב-L.5§ הם הדגימות הראשונות הטבעיות.
7. **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 Python 3 (LEF (numpy, scipy, המדפיסה את הערכים של כל סעיף מן הקלטים המוצגים בטקסט. החבילה מלווה את הסדרה כחומר משלים, ומופקדת ב-Zenodo; doi:10.5281/zenodo.22743615 ה-DOI מוביל תמיד לגרסה העדכנית).

- Xu, R., Xiao, Z., Wang, Y., Luo, F., & Ma, Y. (2024). Minimum velocity for impact ejecta to form [S1] secondaries on terrestrial bodies. *Communications Earth & Environment*, 5, 641. DOI: .10.1038/s43247-024-01820-x
- Armstrong, J. C., Wells, L. E., & Gonzalez, G. (2002). Rummaging through Earth's attic for [S2] remains of ancient life. *Icarus*, 160, 183–196. Authors' version: arXiv:astro-ph/0207316. Concerns .material ejected in impacts; does not validate the internal ejection of LEF
- Sekine, T., Kobayashi, T., Nishio, M., & Takahashi, E. (2008). Shock equation of state of basalt. [S3] *Earth, Planets and Space*, 60, 999–1003. DOI: 10.1186/BF03352857
- Stöffler, D., & Metzler, K. (2016). Proposal for a unified classification system of shock [S4] metamorphosed planetary silicate rocks — call for comments. *79th Annual Meeting of the Meteoritical Society*, abstract 6075. Used here for the principle of calibration by material and minerals; it does not .supply a uniform threshold for every sample
- Housen, K. R., & Holsapple, K. A. (2011). Ejecta from impact craters. *Icarus*, 211, 856–875. DOI: [S5] 10.1016/j.icarus.2010.09.017. The scaling law is used in this paper for sensitivity only; no .experimental calibration was performed for a hot, layered sialic target
- Robbins, S. J. (2019). A new global database of lunar impact craters >1–2 km: 1. Crater locations [S6] and sizes, comparisons with published databases, and global analysis. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 124, 871–892
- Barker, M. K., Mazarico, E., Neumann, G. A., Zuber, M. T., Haruyama, J., & Smith, D. E. (2016). A [S7] new lunar digital elevation model from the Lunar Orbiter Laser Altimeter and SELENE Terrain Camera. *Icarus*, 273, 346–355. (SLDEM2015.)
- Neish, C. D., Madden, J., Carter, L. M., Hawke, B. R., Giguere, T., Bray, V. J., Osinski, G. R., & [S8] Cahill, J. T. S. (2014). Global distribution of lunar impact melt flows. *Icarus*, 239, 105–117
- Jozwiak, L. M., Head, J. W., Zuber, M. T., Smith, D. E., & Neumann, G. A. (2012). Lunar floor- [S9] fractured craters: classification, distribution, origin and implications for magmatism and shallow crustal .structure. *Journal of Geophysical Research*, 117, E11005. doi:10.1029/2012JE004134
- Otake, H., Ohtake, M., & Hirata, N. (2012). Lunar iron and titanium abundance algorithms based [S10] 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, 5102. (The maps of the source test, §C.1.)
- Lawrence, D. J., Elphic, R. C., Feldman, W. C., Prettyman, T. H., Gasnault, O., & Maurice, S. [S11] (2003). Small-area thorium features on the lunar surface. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 108(E9), 5102. DOI: 10.1029/2003JE002050. The map used is the Lunar Prospector half-degree .thorium product (PDS special products, December 2001)

- Zhu, M.-H., Artemieva, N., Morbidelli, A., Yin, Q.-Z., Becker, H., & Wünnemann, K. (2019). [S12] Reconstructing the late-accretion history of the Moon. *Nature*, 571, 226–229. DOI: 10.1038/s41586-019-1359-0. Retention ratio, the siderophile budget of the lunar crust and mantle, and the mass of the .bombardment; read here for the literature's own numbers
- Collins, G. S., Melosh, H. J., & Marcus, R. A. (2005). Earth Impact Effects Program: A Web- [S13] based computer program for calculating the regional environmental consequences of a meteoroid impact on Earth. *Meteoritics & Planetary Science*, 40, 817–840. DOI: 10.1111/j.1945-5100.2005.tb00157.x. Scaling of transient and final crater diameter, used here for the literature's .reading
- Worsham, E. A., & Kleine, T. (2020). Ruthenium isotopic composition of lunar impactites. [S14] .*Goldschmidt Conference*, abstract 2887
- Liu, J., Sharp, M., Ash, R. D., Kring, D. A., & Walker, R. J. (2015). Diverse impactors in Apollo 15 [S15] 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
- Wang, Y., Wu, B., Xue, H., Li, X., & Ma, J. (2021). An improved global catalog of lunar impact [S16] craters (≥ 1 km) with 3D morphometric information and updates on global crater analysis. *Journal of .Geophysical Research: Planets*, 126, e2020JE006728. DOI: 10.1029/2020JE006728
- Li et al. (2025). Discovery of a carbonaceous chondritic fragment in Chang'e-5 regolith samples. [S17] .*Icarus*
- Chinese Academy of Sciences (2025, October 21). Scientists discover rare meteorite relics in [S18] Chang'e-6 lunar samples (CI-like chondrite relics identified by mineralogy and oxygen isotopes). https://english.cas.cn/newsroom/cas_media/202510/t20251021_1089914.shtml
- Murase, T., & McBirney, A. R. (1970). Viscosity of lunar lavas. *Science*, 167, 1491–1493. DOI: [S19] .10.1126/science.167.3924.1491
- Hiesinger, H., Head, J. W., Wolf, U., Jaumann, R., & Neukum, G. (2011). Ages and stratigraphy [S20] 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
- Evans, A. J., Soderblom, J. M., Andrews-Hanna, J. C., Solomon, S. C., & Zuber, M. T. (2016). [S21] Identification of buried lunar impact craters from GRAIL data and implications for the nearside maria. .*Geophysical Research Letters*, 43, 2445–2455
- Le Feuvre, M., & Wieczorek, M. A. (2011). Nonuniform cratering of the Moon and a revised [S22] .crater chronology of the inner Solar System. *Icarus*, 214, 1–20
- Gallant, J., Gladman, B., & Ćuk, M. (2009). Current bombardment of the Earth–Moon system: [S23] .emphasis on cratering asymmetries. *Icarus*, 202, 371–382
- Whitten, J. L., & Head, J. W. (2015). Lunar cryptomaria: physical characteristics, distribution, [S24] .and implications for ancient volcanism. *Icarus*, 247, 150–171

Du, J., Fa, W., Wieczorek, M. A., et al. (2019). Thickness of lunar mare basalts: new results [S25] based on modeling the degradation of partially buried craters. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 124, 2430–2459. DOI: 10.1029/2018JE005872

Mustard, J. F., Li, L., & He, G. (1998). Nonlinear spectral mixture modeling of lunar multispectral [S26] data: implications for lateral transport. *Journal of Geophysical Research*, 103. DOI: 10.1029/98JE01901

Pike, R. J. (1977). Size-dependence in the shape of fresh impact craters on the Moon. In *Impact [S27] and Explosion Cratering*, Pergamon, 489–509

Melosh, H. J. (1989). *Impact Cratering: A Geologic Process*. Oxford University Press [S28]

Tompkins, S., & Pieters, C. M. (1999). Mineralogy of the lunar crust: results from Clementine. [S29] *Meteoritics & Planetary Science*, 34, 25–41

Korotev, R. L., Jolliff, B. L., Zeigler, R. A., Seddio, S. M., & Haskin, L. A. (2011). Apollo 12 [S30] revisited. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 75, 1540–1573. DOI: 10.1016/j.gca.2010.12.018

Wieczorek, M. A., Neumann, G. A., Nimmo, F., et al. (2013). The crust of the Moon as seen by [S31] GRAIL. *Science*, 339, 671–675. DOI: 10.1126/science.1231530

Gong, S., Wieczorek, M. A., Nimmo, F., Kiefer, W. S., Head, J. W., Huang, C., Smith, D. E., & [S32] 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

Duran, Z. *The Model* (1), *LEF Mechanism in Principle* (2), *LEF Mechanism in כתבי היד של הסדרה: Practice* (3), *The Orbit* (4), *The Maria* (5), *The Poles* (7), *South Pole–Aitken* (8), *The Stripes* (9), *Mars* (10), *The Requirements* (11), הטקסטים המשולבים, ספטמבר 2026. הם המקור של הגדרות התרחיש ושל החישובים הפנימיים של הסדרה; הם אינם אימות תצפיתי חיצוני. המסגרת להשוואה עם נתוני הירח מרוכזת במאמר 11, *The Requirements*.

זמינות הנתונים: לא נוצר כאן קטלוג מכתשים חדש. המדידות של חלקים C-I ו-L נעשו על קטלוגים, מודלי גבהים ומפות שפורסמו [S6, S7, S10, S11, S16]. כל קלטי הדוגמה והמשוואות לשחזור מופיעים בגוף המאמר ובנספח. ערכי האטמוספירה, מהירויות ההשלכה ומקדמי הרגישות הם הנחות מבחן, ולא מדידות של תנאי היווצרות.