

תוכן העניינים

5	מבוא
8	פרק 1. מרחקים וזמנים אסטרונומיים: ממערכת השמש לכוכבים
	1.1 מקומנו במרחב ובזמן
	1.2 מערכת השמש
	1.3 היקום שמעבר למערכת השמש
	1.4 חיים מחוץ לכדור הארץ?
14	פרק 2. מערכת השמש
	2.1 כוכבי הלכת הארציים
	2.2 ענקי הגז
	2.3 הגופים הקטנים במערכת השמש
	2.4 כוכבי הלכת: מאפיינים פיסיקליים ומסלוליים
	2.5 היווצרות מערכת השמש
	2.6 יסודות החיים
	2.7 האזור הישיב במערכת השמש
36	פרק 3. כוכבי לכת חוץ-שמשיים (Exoplanets)
	3.1 האזור הישיב של כוכבים מסוגים שונים
	3.2 שיטות לגילוי כוכבי לכת חוצניים
	3.3 תכונות של פלנטות חוצניות

57	פרק 4. החיים בכדור הארץ
	4.1 נקודות עיקריות בהתפתחות החיים בכדור הארץ
	4.2 הרכב כדור הארץ והחיים
	4.3 מקור החיים בכדור הארץ
	4.4 גורמים אסטרונומיים, גיאולוגיים ואטמוספריים
65	פרק 5. חיים מחוץ לכדור הארץ
	5.1 החיים מהם?
	5.2 שמשות ופלנטות מתאימות לחיים
	5.3 הסיכוי להופעת חיים
70	פרק 6. החיפוש אחר תבונה
	6.1 משוואת דרייק
	6.2 חיפוש אחרי שידורי רדיו של תרבויות
	6.3 תרבויות בגלקסיה
	6.4 טיסה בחלל ופרדוקס פרמי
90	נספח א: נוסחאות וקבועים אסטרונומיים
92	נספח ב: רשימת קריאה
94	נספח ג: סילבוס הקורס מס' 77212
95	נספח ד: שאלות לדוגמה
96	נספח ה: רשימת האיורים והמקורות

מבוא

אחת השאלות המרכזיות בחקר היקום היא האם קיימים חיים מחוץ לכדור הארץ. שאלה זו, שבעבר הייתה נחלתם של פילוסופים ואנשי דת בלבד, הפכה בעשורים האחרונים לשאלה מדעית הניתנת למחקר אמפירי. ההתקדמות הטכנולוגית, ובפרט פיתוח טלסקופים מתקדמים כמו טלסקופ החלל ג'יימס ווב, מאפשרת לנו לחקור כוכבי לכת מחוץ למערכת השמש ולבחון את התנאים השוררים בהם.

מהי אסטרוביולוגיה?

אסטרוביולוגיה היא תחום מחקר רב-תחומי החוקר את מקור החיים והתפתחותם, תנאי קיומם האפשריים במקומות שונים ביקום, ואת האפשרות להימצאות חיים מחוץ לכדור הארץ. התחום משלב ידע ושיטות מכמה תחומי מדע, בהם ביולוגיה מולקולרית, כימיה אורגנית, אסטרונומיה, גיאולוגיה, ופיזיקה. אחת מהמטרות המרכזיות של אסטרוביולוגיה היא לזהות סביבות אסטרונומיות שבהן מתקיימים תנאים פוטנציאליים להיווצרות חיים, כמו מים נוזליים, מקורות אנרגיה יציבים, ונוכחות של יסודות חיוניים כגון פחמן, חמצן, וחנקן. היא מנסה לגלות תנאים להתפתחות וקיום חיים במגוון מקומות בחלל, ממערכת השמש שלנו ועד לכוכבי לכת מרוחקים במערכות שמש אחרות שהתגלו רק ב-2-3 העשורים האחרונים.

אסטרוביולוגים חוקרים גם את מה שמכונה "חיים קיצוניים" על פני כדור הארץ — אורגניזמים המסוגלים לשרוד בתנאים של טמפרטורות קיצוניות, חומציות גבוהה, לחץ גבוה או קרינה חזקה — על מנת להסיק מסקנות לגבי אפשרויות החיים על גופים אחרים כמו מאדים, אירופה (ירחו של צדק) או טיטאן (ירחו של שבתאי). בנוסף, אסטרוביולוגיה עוסקת בהבנת התהליכים שהובילו להיווצרות החיים הראשונים על פני כדור הארץ ובפיתוח מודלים תיאורטיים למציאת חיים על כוכבי לכת מחוץ למערכת השמש.

מה בספר?

נפתח בהבנת מקומנו ביקום, במרחב ובזמן.

בפרק השני נסקור את פוטנציאל החיים במערכת השמש שלנו, שם קל יחסית לחפש חיים, באמצעות תצפיות ומשימות חלל. הגם שעדיין לא נמצאו ראיות לחיים מחוץ לכדור הארץ, בהווה או בעבר, החיפוש נמשך, ובפרט במאדים, בירחים של צדק ושבתאי, ובגופים קטנים כמו אסטרואידים.

בפרק השלישי נתאר את החיפוש אחר עולמות המתאימים להתפתחות חיים במערכות שמש אחרות, ובפרט כוכבי הלכת (פלנטות) שלהן. נלמד על שיטות מתוחכמות המשמשות את המדענים לגילוי כוכבי לכת במערכות שמש מרוחקות וחיפוש חיים על כוכבי הלכת המבטיחים יותר, ונלמד איך הם מחשבים תכונות רבות של אותן פלנטות מרוחקות לאין שיעור.

בפרק הרביעי נתמקד בהתפתחות החיים בכדור הארץ, מתוך הבנה שכדי לחפש ולחקור חיים בעולמות אחרים עלינו להכיר את החיים בעולמנו, את הגורמים והסביבה שהשפיעו על התפתחותם ושרידותם.

הפרק החמישי עוסק במהות החיים ותכונותיהם העיקריות. כמו כן עוסק הפרק בשאלה היכן בחלל יש סיכוי שהתפתחו חיים ואיך נוכל לגלות סימנים לקיום חיים בפלנטות מרוחקות.

הפרק השישי והאחרון עוסק בחיפוש חיים ותבונה מחוץ לכדור הארץ: משוואת דרייק, SETI, וטיסה בחלל. לאורך הספר מובאות שאלות לדוגמה, הממחישות עקרונות בסיסיים לפתרון שאלות חישוביות. יחד עם זאת ניתן להשתמש בספר גם ללא אותם חישובים ונוסחאות.

כותרות אסטרונומיה בחדשות

כותרות חדשות רבות על אפשרות לגילוי חיים מחוץ לכדור הארץ בעבר כמו גם בשנים האחרונות עוסקות במאדים. בשנת 2015 הודיעה נאס"א על גילוי מים נוזליים במאדים, ובשנת 2018 גילו שם מולקולות אורגניות. למרות שזו אינה הוכחה שיש שם חיים, זכו התגליות האלה לסיקור נרחב. ב-2025 נמצאו עדויות שבעבר התקיימו במאדים אטמוספירה סמיכה יותר ומחזור פחמן.¹

גם על גילויים מחוץ למערכת השמש הופיעו כותרות מרעישות: בשנת 2015 הודיעה נאס"א כי טלסקופ החלל קפלר גילה אלפי כוכבי לכת במערכות שמש רחוקות. ב-2017 התגלתה מערכת שמש ובה שבעה כוכבי לכת בגודל דומה לגודלו של כדור הארץ,² כמה מהם במרחק מתאים מן השמש שלהם לקיום מים נוזליים על פניהם. ב-2025 פרסם ה"ניו יורק טיימס" כתבה על גילוי אפשרות לסימני חיים בכוכב לכת במערכת שמש רחוקה.³

ובנימה אישית... על הקורס שממנו צמח הספר

התמזל מזלי ללמד אסטרונומיה בדיוק בתקופה מרגשת זו, והקורס ממנו צמח הספר התפתח במהלך עשרים וחמש השנים האחרונות יחד עם גילויים של כוכבי לכת ועולמות עם פוטנציאל לחיים הרחק מעבר למערכת השמש שלנו.

בשנת 1999 נפתח הקורס "אסטרונומיה והחיים ביקום" באוניברסיטה העברית בירושלים ונרשמו מעל 200 סטודנטים. מאז לימדתי אותו במשך 25 שנים רצופות, כאשר הקורס הולך ומתפתח במקביל לגילויים של כוכבי לכת במערכות שמש רחוקות. את הקורס הראשון התחלתי בנימה אופטימית: "אסטרונומיה כנראה תוכיח בקרוב שאנחנו לא לבד, שכן בשנים הקרובות אנו מצפים לגלות מערכות שמש רבות עם כוכבי לכת". בשנות ה-2000 התחלתי את הקורסים באמירה אופטימית אף יותר: "כוכבי הלכת הראשונים מחוץ למערכת השמש כבר התגלו, ולמרות שהם עדיין מעטים מאוד, ייתכן שנגלה בקרוב שזהו רק קצה הקרחון; כך שיתכן שהיקום משגשג בחיים". זה היה גם המסר של הרצאתי הפומבית באוניברסיטה בשנת 2006, בנושא "חיים בעולמות רחוקים"⁴ ושל כמה הרצאות שנתתי בשנים שלאחר מכן בכנסים מדעיים.

אחרי שנת 2009 התחזית בתחילת הקורס הפכה יותר קונקרטי: "אנחנו כבר יודעים שכוכבי לכת נפוצים, ולמרות שאלה שגילינו עד כה אינם נראים מתאימים לחיים, בשנים הקרובות טלסקופ החלל קפלר (ששוגר

¹ <https://www.science.org/doi/10.1126/science.ado9966>

² <https://science.nasa.gov/exoplanets/trappist1/>

³ <https://www.nytimes.com/2025/04/16/science/astronomy-exoplanets-habitable-k218b.html>

⁴ https://www.youtube.com/watch?v=aDp0l_KYUTY

באותה שנה) עשוי למצוא כוכבי לכת מהסוג הנכון, שעל פניהם יוכלו להתקיים חיים". בשנת 2011 הגשתי לכתב עת מדעי מאמר "על שכיחות החיים מחוץ לכדור הארץ בעידן קפלר" שהעריך כי בתוך כמה שנים משימת קפלר תמצא כוכבי לכת רבים דמויי כדור הארץ במערכות שמש אחרות. המבקר סבר שהתחזית ספקולטיבית מדי והמאמר נדחה. עברו עוד כמה שנים עד שאנשים התרגלו לתוצאות החדשות, אז המאמר פורסם וזכה לתהודה רבה.⁵ בשנת 2016 התחלתי ללמד, בנוסף לקורס לתלמידי מדעי הטבע, קורס במסגרת תכנית "אבני פינה", המותאם למדעי החברה והרוח, הנקרא "אסטרוביולוגיה והחיים ביקום", שאף הוקלט והפך לקורס פופולרי ביותר.⁶ מזה כארבע שנים אני עוסק יחד עם עמיתי פרופ' יוסף גיל בכתיבת ספר לימוד מקיף⁷ (באנגלית) שיצא לאור בספטמבר 2025, וגם חומרים ממנו נכללו בספר הנוכחי.

כיום מאפשר טלסקופ החלל ג'יימס ווב לזהות חתימות של מולקולות שונות באטמוספרות של כוכבי לכת רחוקים. בשנים הקרובות יצטרפו אליו עוד טלסקופים מתקדמים בעלי יכולות דומות. לכן, בשנים האחרונות אני פותח את הקורסים שלי (וגם את הספר הזה) במשפט "יתכן שכבר בשנים הקרובות נגלה עדויות לקיום ביולוגיה ואולי אף חיים בכוכבי לכת מרוחקים".

ירושלים, יוני 2025

⁵ <https://www.cambridge.org/core/journals/international-journal-of-astrobiology/article/on-the-abundance-of-extraterrestrial-life-after-the-kepler-mission/7274FE1D5D7FBE0611E34055C13298C7>

⁶ <https://www.youtube.com/playlist?list=PLT-roSWlpp1EG9mE3RfYLysxF5wyYgJOh>

⁷ <https://link.springer.com/book/978-3-031-64639-3>