



איור 1: רוחות מזרחיות סוחפות אבק מדברי מצ'אד ומאוריטניה לעבר האוקיינוס האטלנטי. צילום לוויין: נאס"א.



קשר לנושא לימוד:
כדור הארץ והיקום;
מערכות טכנולוגיות
ומוצרים

ד"ר יואב יאיר - מנהל
פרויקט MEIDEX,
האוניברסיטה הפתוחה

טיסה אל החלל בכחול- לבן

ד"ר יואב יאיר

בשעות הבוקר של אחד מימי הקיץ הקרוב יחריש רעש אדיר את שלוות הביצות של דרום פלורידה. ענן עצום של קיטור רותח ייתמר מעל כן-השיגור, ולהבה בהירה תאיר את שמי התכלת של קייפ קנדי: מעבורת חלל נוספת יצאה לדרך. השקנאים והתניניים יביטו במבט אדיש אל המעבורת המאיצה כלפי מעלה, ויתעלמו מקריאות ההתלהבות ומחזיונות הכפיים של הצופים. זהו השיגור ה-111 של מעבורת החלל, טיסה 107 של המעבורת קולומביה (Columbia) ובכל זאת, משהו שונה הפעם בשיגור זה: המעבורת נושאת עמה איש צוות כחול-לבן, אסטרונאוט ישראלי ראשון במשימת מחקר מדעית בחלל. טיסתה ה-28 של המעבורת קולומביה תשלים ארבע שנים של עבודה מאומצת של צוות מדענים ומהנדסים באוניברסיטת תל-אביב ובחיל-האוויר. היא תאריך 16 יממות, ובמהלכה יתבצעו בה יותר מ-40 ניסויים מדעיים שונים. אחד מאלה הוא ניסוי מיידיקס (MEIDEX - Mediterranean Israeli Dust Experiment) שפירושו בעברית - הניסוי הישראלי על אבק בים התיכון.

מדוע לחקור אבק?

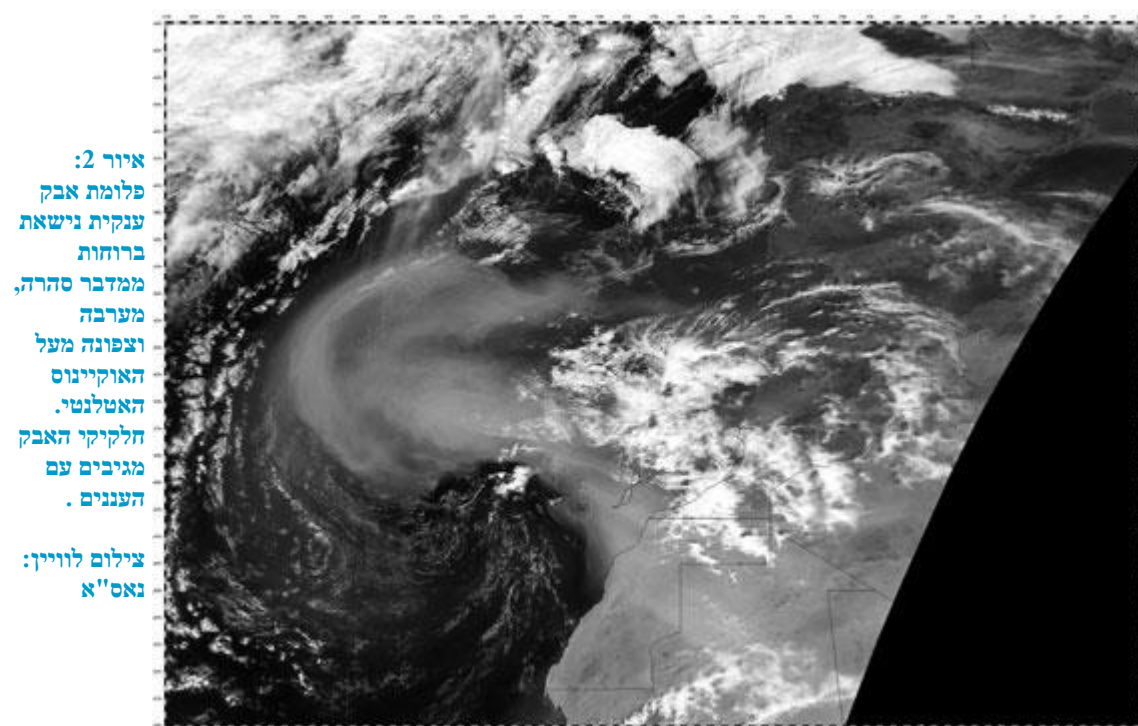
מה שאנו רגילים לכונו "אבק" הוא רק סוג אחד של חלקיקים הנמצאים באוויר, המכונים בשפה המקצועית אוירוסולים (aerosols). הם חלקיקים זעירים, שגודלם נע ממאית המיקרון ועד עשרות בודדות של מיקרונים (מיקרון = מיליונית המטר) והנמצאים באופן קבוע באטמוספירה התחתונה של כדור-הארץ. נודעת להם חשיבות רבה במגוון רחב של תהליכים כימיים ופיסיקליים, הקובעים את מזג-האוויר והאקלים. לעננים של חלקיקי אבק, המוסעים מאזורי מקור (source) במדבריות הגדולים של העולם, יש השפעה ישירה על מאזן הקרינה בתחום האטמוספירה שבו הם שוכנים, בשל תופעות החזרה ובליעה של קרינת השמש. במקרים קיצוניים של סופות אבק חזקות עשוי להיווצר אובך, המגביל את הראות ומעכיר את האטמוספירה בצורה קשה המונעת, למשל, טיסות משדות תעופה. חלק מהקוראים בוודאי זוכר את ימי סופות האבק הגדולים של האביב הקודם, שהעניקו גוון כתום מוזר לשמי ישראל (ראו צילום על העטיפה האחורית). להימצאותם של אוירוסולים באוויר יש השפעה ישירה (direct effect) על האקלים, אך שיעורה המדויק אינו ידוע עדיין. יש אוירוסולים המכילים מרכיב מסיס במים, והוא הופך אותם לגרעיני התעבות (cloud condensation nuclei) החיוניים ליצירת עננים. חלק מהם אף משמש בתור גרעיני קיפאון (ice nuclei), המשפיעים על המהירות והיעילות של תהליכי יצירת הגשם בתוך העננים. טיב התפלגות גודלי החלקיקים (כלומר מהו ריכוז החלקיקים בכל רדיוס) משפיע על מהירות היווצרות טיפות הענן והגשם, וקובע במידה רבה את זמן הקיום של העננים. מחקר חדש, שנערך באוניברסיטה העברית בירושלים, מצא שאבק מדברי יכול לגרום להפחתה בכמויות הגשם היורדות מעננים, משום שריבוי גרעיני ההתעבות יוצר טיפות קטנות וכך מאט את יצירת הגשם. ההסבר לתופעה זו הוא ב"תחרות" המתרחשת בין הטיפונות על משאבי אדי-המים המצויים בתוך הענן, שגורמת לכך שנוצרות טיפות רבות באותו גודל. יצירת גשם כרוכה בהתלכדותן של טיפונות רבות, ויעילות תהליך זה גוברת כשיש טיפונות בגדלים שונים (המתבטאים במהירות נפילה שונה בענן ובקצב התנגשויות גדול). מכאן שלהתפלגות אחידה של טיפונות יש השפעה שלילית על קצב ההתנגשויות ועל יעילות יצירת הגשם. לעננים עצמם ולגודל החלקיקים בתוכם יש השפעה מרכזית על מאזן הקרינה של כדור-הארץ, משום שהם מחזירים (reflectors) ובלועים (absorbers) מאד של קרינה באורכי-גל שונים. מכיוון שכמות קרינת השמש המגיעה לפני השטח קובעת את הטמפרטורה ואת כמות קרינת החום התת-אדומה הנפלטת אל האטמוספירה ונבלעת בה (על-

ידי גזים כמו פחמן דו-חמצני), ברור אפוא שלעננים יש תפקיד מרכזי בוויסות הטמפרטורה הגלובלית. תרומה זו נקראת "השפעה הבלתי-ישירה" (indirect effect של האווירוסולים על האקלים. גם שיעורה של זו אינו ידוע במדויק. בשנים האחרונות נתגלה, שחידקים שונים מתיישבים על גבי חלקיקי אבק, וכך יכולים לקבל "טרמפ" למרחקים עצומים. חידקים של מחלות טרופיות או נבגים רעילים שונים ויבשים, במצב "רדום" (כמו האנתרקס, הזורע בהלה בימים אלה של טרור ביולוגי), נדבקים למינרלים המרכיבים את האבק. אחת ההשערות להתפרצות של מגפות היא תנועה עונתית של חידקים, הנישאים עם הרוחות מהמדבר אל עברו השני של האוקיינוס, מקום בו החלקיקים צונחים בסביבה ביולוגית חדשה. זו מהווה כר פורה, ובו מתעוררים החידקים הזרים מתרדמתם ומפיצים את המחלה.

השפעה בריאותית לא פחותה היא זו של החלקיקים הזעירים על מחלות כלי הנשימה ועל אלרגיות שונות - בפרט אצל ילדים וקשישים. נמצא שאבק מדברי יכול להזיק ולגרום להתפתחות אסתמה וברונכיט אצל אוכלוסייה, החשופה לריכוזים גבוהים של אבק מרחף. מחקרים רפואיים בפלורידה הראו מתאם בין עליית התפוצה של המחלה לבין שנות בצורת באפריקה, בהן יש סופות אבק רבות.

אולם האבק אינו רק גורם שלילי; תגלית מעניינת נוספת היא תרומתו של האבק המדברי - ובפרט המינרלים מכילי הברזל שבתוכו - למעגל המזון באוקיינוסים. מסתבר שהאבק משמש מקור חשוב של המינרלים לפלנקטון (plankton), שהוא בסיס שרשרת המזון הימית. החלקיקים הצונחים על פני הים מתמוססים בחלקם ומשחררים יונים של מתכות, הזמינים למטבוליזם של הפלנקטון. שינוי האקלים העולמי והתחממות האטמוספירה (change) (global) נמצאים זה כמה שנים בחזית המחקר האטמוספירי בגופים רבים בעולם, בהם אוניברסיטאות וסוכנויות חלל לאומיות שונות. אחת ההשערות המקובלות אומרת, שתרומתם של האווירוסולים תתבטא בקירור יחסי של האטמוספירה, שיבלום את ההתחממות הצפויה עקב ריבוי גזי החממה. במסגרת (Mission to Planet Earth - Earth Observing System), מקדישה NASA משאבים רבים לחישה מרחוק - מלוויינים ומפלטרומות אחרות - של כדור-הארץ על מערכותיו השונות, תוך ניסיון להבין את קשרי-הגומלין השונים במערכת האקלימית. קיים צורך קריטי בהדמיה תקינה של התהליכים, שבהם מעורבים אווירוסולים, בכל המודלים המתמטיים, המנסים לחזות ולנבא את התנהגות האקלים בעתיד הקרוב.

ניסוי MEIDEX נועד לתת מענה לחלק מהשאלות הפתוחות עדיין בתחום תפקידם של האווירוסולים בתהליכים אטמוספיריים אלה.



מטרות הניסוי

מדידות האבק המדברי ממעבורת החלל MEIDEX מתמקדת בחישה מרחוק ובמעקב אחר תנועתם של אווירוסולים, המגיעים ממדבר סהרה לאזור הים התיכון והאוקיינוס האטלנטי. על-פי הידוע כיום, מהווה מדבר סהרה את אחד המקורות הראשיים בעולם כולו לחלקיקי אבק מדברי, המוסעים לעבר אירופה, למזרח הים התיכון ואף ליבשת אמריקה (לרוב האוקיינוס האטלנטי). כיום מבוצע מעקב אחר מדד האווירוסולים (aerosol index) באמצעות חיישן TOMS על-גבי לוויין של NASA, ובאמצעות מכשיר

MODIS על גבי לוויין Terra גם הוא של NASA לשני חיישנים אלה נדרשים אימות קרקעי וכיול באמצעות מערכת אחרת, וכאן בא לידי ביטוי יתרונו של ניסוי MEIDEX הוא משלב בתוכו מדידות בכמה אורכי-גל מהחלל של הקרינה המוחזרת מפני כדור-הארץ ומהאטמוספירה, עם מדידות מוטסות במטוס ממוכשר ובחיישנים קרקעיים באותם מקומות ובאותם זמנים. התפיסה של MEIDEX נועדה לאפשר כיול אבסולוטי של מדידות החישה-מרחוק, ולתרום לשיפור המודלים של מעבר הקרינה באטמוספירה על-ידי השגת נתונים מתוך פלומת האבק על הריכוז וההרכב של החלקיקים. זהו פן ייחודי, ויש לו ערך גבוה מבחינה מדעית. הוא יכול לשאת תפוקות משמעותיות בהיבט של פענוח ושל הבנה משופרת של המידע, המושג מפלטפורמות חלליות שונות של NASA.



איור 3: שיגור מעבורת החלל. צילום: נאס"א

לראשונה טסה המעבורת "קולומביה" בשנת 1981, והיוותה את המעבורת הראשונה בציי החלל של נאס"א, שכלל חמש מעבורות. מלבדה נבנו גם "אנדיבר", "דיסקברי", "אטלנטיס" ו"צ'לנג'ר". האחרונה התפוצצה בתאונה טרגית זמן קצר לאחר השיגור בשנת 1986. בשנה האחרונה שופצה "קולומביה" הוותיקה והוחלפו בה מחשבים ומערכות הניווט והבקרה. היא ערוכה לבצע משימות מדעיות שונות - בעוד אחיזתיה לצי עסוקות בבניית תחנת-החלל הבינלאומית ובהטסת ציוד ואנשי צוות לעיר-חלל קטנה זו, המרחפת בגובה 320 ק"מ במסלול סביב כדור-הארץ. מעבורת (space shuttle) היא מעין מטוס חלל, המשוגר באמצעות טיל אל החלל, עד שהיא מגיעה אל הגובה המתוכנן ונכנסת למסלול הקפה סביב כדור-הארץ. המעבורת נעה במהירות רבה ומקיפה את כדור-הארץ בכל שעה וחצי ולמעשה היא נמצאת בפילה חופשית, המביאה לכך ששוררים בה תנאי חוסר-כבידה (בדומה למעלית הנופלת בתוך בניין ללא כבל, בה שוררת באופן רגעי נפילה חופשית ואותה תחושה של ריחוף ללא משקל). המעבורת קטנה מאוד, כמחצית ממטוס ג'מבו רגיל - והמרחב הפנימי לאנשי הצוות מצומצם למדי. עיקר נפח המעבורת מהווה תא-המטען הגדול שלה, המשמש לנשיאה של לוויינים אל מסלולם או לצורך הבאתם ארצה לתיקונים. החללית "גליליאו", שהגיעה לכוכב-הלכת צדק, שוגרה מסיפונה של מעבורת חלל, וכמותה גם החללית "מגלן", שחקרה את נוגה, ולוויינים רבים אחרים. צוות האסטרונאוטים יוצא להליכות חלל ומבצע משימות מגוונות - כמו, למשל, תיקונים

בטלסקופ החלל האבל או התקנת ציוד בתחנת החלל.

שמות אנשי הצוות לטיסה זו:
מפקד: ריק הסבנד; טייס: וילי
מקקול; מפקד ניסויים: מייקל
אנדרסון; מתפעלי ניסויים ומומחי
מטען: דייוויד בראון, לאורל
קלארק, קלפנה צ'וואלה, אילן
רמון.

שיטת ביצוע הניסוי

ניסוי MEIDEX עתיד לטוס על-גבי המעבורת "קולומביה" בטיסה בגובה של כ-280 ק"מ (איור 3). בניסוי תבוצע מדידה סימולטנית, בכמה אורכי גל, של נפח אטמוספירי המכיל אבק באמצעות מצלמות מכוילות, שיתופעלו על-ידי אילן רמון ועל ידי אנשי צוות נוספים במעבורת החלל. ה"קולומביה" תשוגר במסלול בעל זווית-נטייה גבוהה (39 מעלות) ותעבור מעל הים התיכון בין 2 ל-3 פעמים ביממה בשעות האור, כשהמרווח האופקי בין מסלולים רצופים הוא בסדר גודל של 1,900 ק"מ. האסטרונוט יידע זמן מספיק מראש את מיקומם של ענני האבק על-פי נתונים שיועברו אליו מרשתות תצפית, ממודל מתמטי לחיזוי סופות אבק שפותח באוניברסיטת תל-אביב וממדיע שוטף המגיע מחישובים בלוייני (NASA כמו למשל TOMS). הקשר הדו-כיווני עם צוות החוקרים, שיימצאו במערך הפיקוד של NASA במרכז החלל ע"ש גודרד במרילנד Goddard Space Flight Center) GSFC) יאפשר גמישות בהפניית המצלמות לעבר המטרה, כך שניתן יהיה "ליירט" את המטרה המבוקשת אף אם מיקומה אינו בדיוק "מתחת" למסלול המעבורת. האסטרונוט יקליט את המדיע, ויעריך את טיב התמונות המתקבלות, וחלק מהמדיע ישודר בזמן-אמת לקרקע לצורכי אנליזה מהירה ולשם גיבוי. במקביל לתצפיות מהחלל תתבצענה טיסות מחקר באותם אזורים, שמעליהם חלפה המעבורת, לדגימה של החלקיקים ומדידה באתר של ריכוזיהם (In-Situ measurement). מטוס המחקר נושא צוות של ארבעה מדענים, והוא מכיל מכשור מדויק לדגימה ומדידה בזמן-אמת של תכונות החלקיקים ולחישה של כמויות הקרינה המגיעות מן השמש ומוחזרות מן הקרקע בכל גובה (איור 4).

מכיוון שסופות אבק הן תופעה מתמשכת, ניתן לבצע כמה מדידות לאותה מערכת ולעקוב אחר התפתחותה; ואכן המשימה מתוכננת למשך 16 יממות. בחדשי הקיץ שכיחותן של סופות האבק גדולה יותר במערב הים התיכון, ולפיכך סביר שהמדידות המוטסות תתבצענה באזור סיציליה. בתקופת האביב מזרח הים התיכון הוא האזור הפעיל, ואז בסיס היציאה יהיה כנראה באי כרתים.

איור 4: מטוס מחקר ממוחשב למדידת חלקיקי אבק. באדיבות עמית שלר, אוניברסיטת תל-אביב



שדים אדמוניים אל החלל

אחת ממשניות-המשנה המעניינות של ניסוי MEIDEX היא מעקב אחרי התפרקויות חשמליות מפסגות סופות ברקים אל השכבות הגבוהות של האטמוספירה בשעות הלילה. תופעה זו נתגלתה לפני יותר מעשור בעת תצפית אל סופת ברקים, והיא נראית כוזה אדום מעל פסגת הענן בגובה 70-85 ק"מ.

מחקרים רבים בעזרת ציוד משוכלל הראו שהתפרקויות אלה, הנקראות "שדונים" (SPRITE באנגלית), קשורות לברקים חזקים במיוחד, המאפיינים סופות גדולות. רוב התצפיות והמדידות נערכו בארצות-הברית, אך בשנים האחרונות נתגלו "שדונים" גם באירופה, באפריקה ובדרום-מזרח אסיה. בדרך-כלל נלווה להתפרקויות ברקים אות של קרינה אלקטרומגנטית אופיינית. תדירויות מסוימות של, הנקראות "תדירויות תהודת-שומן" (הרצים בודדים עד עשרות הרץ), מתפשטות סביב כדור-הארץ ויכולות להיקלט אלפי קילומטרים מהמקור.

הכוונה היא לנצל את הזמן, שבו שווה המעבורת בצד הלילה של כדור-הארץ, כדי לערוך מדידות אופטיות בעזרת המצלמות ממעבורת החלל - ובו-זמנית מן הקרקע - מכמה מקומות בעולם. האסטרונוט יצלם את האטמוספירה מעל סופות הברקים, ואנטנות מיוחדות יעקבו אחרי האותות בתדירות תהודת שומן. שתי תחנות בישראל - במצפה רמון ובשדה בוקר - יעקבו אחר האותות, ואליהן יצטרפו תחנות קרקע בהונגריה, יפן, ארצות-הברית ואוסטרליה.

מקורות

- יאיר יואב וזיו ברוך, מבוא למטאורולוגיה, הוצאת האוניברסיטה הפתוחה, 1994.

אתרים מומלצים

- מדע בנאס"א - נושא האבק :
http://science.msfc.nasa.gov/headlines/y2001/ast26jun_1.htm
- אתר לוויין TOMS העוקב גם אחרי אבק :
http://jwocky.gsfc.nasa.gov/aerosols/today_aero.html
- ישראל בחלל <http://www.cet.ac.il/israspace> :
- מידע על תחנת החלל הבינלאומית <http://spaceflight.nasa.gov/station> :

